

TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

**BETONIN OHUTHIETUTKIMUKSEN JA VETOLUJUUSKOEISTUKSEN  
TULOSTEN VERTAILUKELPOISUUS BETONIN KUNTOTUTKIMUKSISSA**

Antti Autere

Pro gradu –tutkielma  
Oulu Mining School  
Geotieteiden tutkinto-ohjelma  
Huhtikuu 2018

Osasto Geotieteet		Koulutusohjelma (diplomityö) tai Pääaineopintojen ala (lisensiaatintyö) Geotieteet		
Tekijä Antti Autere		Työn ohjaaja (yliopistolla) Juha Pekka Lunkka		
Työn nimi Betonin ohuthietutkimuksen ja vetolujuuskoeistuksen tulosten vertailukelpoisuus betonin kuntotutkimuksissa				
Opintosuunta Maaperägeologia	Työn laji Pro gradu	Aika 4/2018	Sivumäärä 75	
Tiivistelmä				
<p>Betonin kuntotutkimuksia suoritettaessa ohuthietutkimus ja vetolujuuskoeistus ovat yleisesti käytössä olevia tutkimusmenetelmiä. Ohuthietutkimuksella saadaan yksityiskohtaista tietoa muun muassa kovettuneen betonin koostumuksesta, tiiviyydestä, kivi- ja sideaineen laadusta, huokosrakenteesta sekä rapautumatilanteesta. Vetolujuuskokeella tutkitaan betonin vetolujuutta, mutta se antaa samalla viitteitä betonin kunnosta ja rapautuneisuudesta, jotka ovat kuntotutkimuksen kannalta merkityksellisiä asioita. Yhdessä käytettynä ja hyvin toteutettuina menetelmät tukevat ja täydentävät toisiaan sekä palvelevat tehokkaasti betonin kuntotutkimuksen tarpeita.</p> <p>Tutkimuksessa vertailtiin kymmeniä betonin ohuthietutkimuksen ja vetolujuuskoeistusten tuloksia. Käytössä olevaan aineistoon kuului näytteitä julkisivuista, silloista ja kuivatelakasta. Tutkimuskohteet sijaitsivat ympäri Suomea. Vertailu tehtiin kuntotutkimuksissa poratuilla näytteillä. Ohuthietutkimuksen ja vetolujuuskoeistuksen tulosten vertailukelpoisuutta selvitettiin toisiaan vastaavista näytteistä saatuja tuloksia vertaamalla. Ohuthietutkimuksella selvitettiin betonin kunto, vauriot ja rapautuneisuus. Näiden voimakkuutta ja esiintymistä verrattiin vetolujuuskoeistuksen tulokseen ja murtumakohtaan. Vetolujuuskoeistuksen numeerisen tuloksen lisäksi huomioitiin kokeessa tehdyt havainnot ja mahdolliset poikkeamat.</p> <p>Tulosten mukaan ohuthietutkimuksessa saadut tiedot ja vetolujuuskoeistuksen tulokset tukevat pääosin toisiaan, etenkin kun betoni on hyväkuntoista ja rapautumatonta, tai kun betonissa esiintyy voimakkaampaa rapautumista. Ohuthietutkimuksen perusteella hyväkuntoisen rapautumattoman betonin vetolujuustulos on pääosassa tapauksista hyvä. Hajontaa menetelmien tulosten välillä esiintyy, kun ohuthietutkimuksessa betonissa on havaittu jonkin asteista rapaamaa. Tämän perusteella vetolujuutta on vaikea arvioida ja tulokset eivät ole usein yhtenäisiä. Vetolujuus ei aina alene rapautuneisuuden arvon kasvaessa. Hajontaa ohuthietutkimuksen ja vetolujuuskoeistuksen tuloksiin aiheuttaa myös tiettyjen vauriomekanismien esiintyminen. Alkalikiviainesreaktion takia vetolujuus voi olla heikko, vaikka ohuthieen perusteella betonin on arvioitu olevan hyväkuntoista. Tämä johtuu ainakin osin siitä, ettei alkalikiviainesreaktio epäsäännöllisen esiintymisensä vuoksi aina näy ohuthieen kattavalla alalla, mutta se esiintyy kuitenkin vetolujuuskappaleessa.</p> <p>Tulosten vertailukelpoisuuden parantamiseksi ohuthieraportissa rapautuneisuutta arvioiva numeerinen arvo ja vetolujuuskokeen tulos tulisi liittää samaan taulukkoon. Lisäksi siihen tulisi sanallinen arvio betonin kunnosta. Nykyisin käytössä oleva viisiportainen rapautuneisuusasteikko tulisi muuttaa suppeammaksi kolme- tai neljäportaiseksi, jolloin se olisi selkeämpi ja vertailukelpoisempi vetolujuustulosten kanssa.</p> <p>Ohuthietutkimuksen kehittämiseksi tulisi kiinnittää huomiota siihen, mistä kohtaa näytekappaletta ohuthie valmistetaan. Tarkoituksenmukaisen informaation saamiseksi ohuthietä ei tule aina valmistaa heti pinnasta alkaen. Huomioon tulee ottaa betoninäytteessä silmämääräisellä tarkastelulla havaittavat vauriot ja tutkimuksen tarkoitus. Mikäli halutaan selvittää nimenomaan vauriomekanismia ja rapautuneisuutta, voidaan ohuthie tehdä silminnähdessä rapautuneesta osasta. Kuntotutkimuksen kannalta merkittävä tieto kuitenkin usein on syvyys, jossa vauriot loppuvat ja hyväkuntoinen betoni alkaa.</p>				
Muita tietoja				

# SISÄLLYSLUETTELO

<b>1. JOHDANTO</b> .....	<b>5</b>
<b>1.1 Betonirakenteiden tutkimus ja korjaustarve</b> .....	<b>7</b>
<b>2. BETONIN MUODOSTAVAT OSA-AINEET</b> .....	<b>8</b>
<b>2.1 Kiviaine</b> .....	<b>8</b>
2.1.1 Rakeisuus.....	9
2.1.2 Kiviaineen raemuoto .....	10
<b>2.2 Vesi</b> .....	<b>11</b>
<b>2.3 Sementti</b> .....	<b>11</b>
2.3.1 Sementtityypit.....	12
<b>2.4 Lisäaineet</b> .....	<b>13</b>
2.4.1 Notkistimet.....	13
2.4.2 Huokostimet .....	14
2.4.3 Hidastimet .....	15
2.4.4 Kiihdyttimet.....	16
<b>3. SEMENTIN JA VEDEN VÄLISET REAKTIOT</b> .....	<b>16</b>
<b>3.1 Hydrataatio</b> .....	<b>16</b>
<b>3.2 Mikrorakenteen syntyminen</b> .....	<b>18</b>
<b>3.3 Sementin sitoutuminen, kovettuminen ja lujuuden kehitys</b> .....	<b>19</b>
<b>3.4 Lujuus</b> .....	<b>20</b>
<b>3.4 Huokostyyppit pienimmästä suurimpaan</b> .....	<b>21</b>
<b>3.5 Haitalliset aineet</b> .....	<b>22</b>
<b>4. BETONIN MUUTTUMINEN JA VAURIOITUMINEN</b> .....	<b>22</b>
<b>4.1 Pakkasrapautuminen</b> .....	<b>24</b>
<b>4.2 Ettringiitti</b> .....	<b>26</b>
<b>4.3 Alkalikiviainesreaktio</b> .....	<b>28</b>
<b>4.4 Teräskorroosio</b> .....	<b>32</b>
<b>4.5 Karbonatisoituminen</b> .....	<b>33</b>
<b>4.6 Kloridit</b> .....	<b>35</b>
<b>4.7 Halkeamat ja kutistumat</b> .....	<b>35</b>
<b>5. KUNTOTUTKIMUS</b> .....	<b>39</b>
<b>5.1 Kenttätutkimukset</b> .....	<b>40</b>
5.1.1 Raudoitteiden peitepaksuus.....	40
5.1.2 Vasarointi.....	40
5.1.3 Karbonatisoitumissyvyys .....	41
<b>5.2 Laboratoriotutkimukset</b> .....	<b>42</b>
5.2.1 Ohuthietutkimus .....	42
5.2.2 Vetolujuuskoe.....	45
5.2.3 Kloridipitoisuus.....	47
<b>6. TUTKIMUKSET</b> .....	<b>48</b>
<b>6.1 Tutkimusmenetelmät</b> .....	<b>48</b>
6.1.1 Ohuthieet ja niiden valmistaminen.....	48
6.1.2 Ohuthieanalyysin menetelmäkuvaus .....	49
6.1.3 Vetolujuuskappaleen valmistaminen ja menetelmäkuvaus.....	52
<b>7. TULOKSET</b> .....	<b>53</b>
<b>7.1 Kohdetutkimus 1, maantiesilta</b> .....	<b>53</b>
<b>7.2 Kohdetutkimus 2, vesistön ylittävä maantiesilta</b> .....	<b>55</b>

7.3 Kohdetutkimus 3, asuinkerrostalo .....	57
7.4 Kohdetutkimus 4, kuivatelakka .....	60
7.5 Kohdetutkimus 5, alikulkusilta .....	62
<b>8. TULOSTEN TARKASTELU .....</b>	<b>66</b>
8.1 Kohdetutkimus 1, maantiesilta (rapautumista ja viitteitä alkalikiviainesreaktiosta)...	66
8.2 Kohdetutkimus 2, vesistön ylittävä maantiesilta (pakkasrapautumista ja alkalikiviainesreaktiota) .....	67
8.3 Kohdetutkimus 3, asuinkerrostalo (pakkasrapautuminen) .....	67
8.4 Kohdetutkimus 4, kuivatelakka (laatu, pakkasrapautuminen ja ettringiitti) .....	68
8.5 Kohdetutkimus 5, alikulkusilta (alkalikiviainesreaktio) .....	68
<b>9. KESKUSTELU .....</b>	<b>69</b>
<b>10. JOHTOPÄÄTÖKSET .....</b>	<b>71</b>
<b>11. KIITOKSET.....</b>	<b>72</b>
<b>12. LÄHDELUETTELO.....</b>	<b>73</b>

## 1. JOHDANTO

Betoni on keinotekoisista kiveä, jossa kiviaine kiinnittyy toisiinsa sementtiliimalla. Veden ja sementin reagoidessa kemiallisesti sementtiliima kovettuu sementtikiveksi. Kiviaineena käytetään usein luonnon soraesiintymistä saatavaa tai kalliosta murskattua kiveä. Kiviaineen, sementin ja veden lisäksi betoniin käytetään myös monia lisä- ja seosaineita, jotka vaikuttavat esimerkiksi betonin työstettävyyteen ja kovettumisreaktioon. (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2004)

Betonirakenteet voidaan jakaa kahteen ryhmään: raudoittamattomiin ja raudoitettuihin rakenteisiin. Raudoittamattomat betonirakenteet on suunniteltu siten, että betoni kestää rakenteeseen kohdistuvat rasitukset. Raudoitettuja betonirakenteita ovat teräsbetoni- ja jännitetyt rakenteet. Niissä suunnittelu on puolestaan suoritettu siten, että rauditus ja betoni toimivat yhdessä betonin ottaessa vastaan puristusrasituksen ja terästen hoitaessa vetorasituksen. Jännitetyt betonirakenteet on jännitetty jänneraudoituksella ennen rakenteen käyttöönottoa, jotta on saatu betonia puristava hyödyllinen jännitystila. Teräsbetonirakenne on tyypiltään huomattavasti yleisin betonirakennetyyppi. (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2004)

Betonia käytetään 13 miljardia kuutiometriä vuosittain koko maailmassa, josta Suomen osuus on noin 5 miljoonaa kuutiometriä. Käyttökohteina ovat talonrakentaminen ja lukuisat infrarakentamisen kohteet. Talonrakentamisessa betonia käytetään muun muassa monenlaisissa rakenteissa rakennusten ala-, väli- ja yläpohjissa, ulkokuorielementteinä, väliseininä, palkkeina, pilareina sekä harkkoina (Kuva 1). (Betoni.com 2017)



Kuva 1. Talonrakentamisessa betoni on paljon käytetty materiaali. (Kuva Antti Autere)

Infrarakentamisessa betonia käytetään esimerkiksi silloissa, padoissa, tunneleissa, satamarakenteissa, vesitorneissa, jätevedenpuhdistamoissa sekä energialaitoksissa ja ydinvoimaloissa (Kuva 2). Huonosti kantavalla maaperällä rakennusten ja teiden perustukset tehdään usein betonilaatan päälle, koska betoni sietää maaperästä tulevaa rasitusta hyvin verrattuna muihin materiaaleihin. (Betoni.com 2017)



Kuva 2. Betonia käytetään monenlaisissa infrarakentamisen kohteissa. (Kuvat Antti Autere)

Betonitutkimuksia tehdään pääsääntöisesti korjausrakentamiseen liittyvien kuntotutkimusten ja korjaussuunnittelun yhteydessä. Tämän pro gradu-työn tarkoituksena oli vertailla Labroc Oy:n betonin ohuthietutkimuksista ja vetolujuuskoestuksessa saatuja tuloksia sekä arvioida niiden korrelaatiota. Lisäksi tarkoituksena oli tuoda esille näkökulmia näiden testausmenetelmien kehittamisestä sekä yhdenmukaisemmasta ja vertailukelpoisemmasta raportoinnista.

## **1.1 Betonirakenteiden tutkimus ja korjaustarve**

Betonirakenteissa voi tapahtua muutoksia olosuhteista, säärasituksesta ja muista tekijöistä johtuen. Muutosten myötä betonin ominaisuudet heikkenevät ja tämä aiheuttaa erilaisia rakenteiden korjaustarpeita. Yleinen syy ikääntyvien rakenteiden ominaisuuksien muuttumiselle on säärasitus, joka voi laukaista rinnakkaisia, yhtä aikaa tapahtuvia vaurioitumismenetelmiä. (Lahdensivu et al. 2015)

Suomen maanteillä oli 1.1.2017 Tiehallinnon hallinnassa 15 160 siltaa jälleenhankinta-arvon ollessa noin kuusi miljardia euroa (Liikennevirasto 2017a). Liikenneväylien korjausvelkaohjelman 2016-2018 mukaan siltojen peruskorjauksiin on varattu 33,2 miljoonaa euroa (Liikennevirasto 2016). Arvion mukaan noin 7000 siltaa saavuttaa peruskorjauksiensa vuoteen 2020 mennessä (Liikennevirasto 2017b).

Rakennukset ja infrarakenteet pyritään pitämään mahdollisimman kauan taloudellisesti kannattavassa kunnossa ja käyttökelpoisena seuraamalla niiden kuntoa ja tarvittaessa huoltamalla. Rakenteisiin syntyneet vauriot ja niiden eteneminen vaikuttavat betonirakenteiden korjaustarpeeseen (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2002). Talonrakentamisessa korjausrakentaminen on ylittänyt uudisrakentamisen arvon useiden vuosien ajan. Vuonna 2015 korjausrakentamisen arvo oli yli 12 miljardia euroa uudisrakentamisen arvon ollessa noin 10 miljardia euroa (ROTI 2017).

Kuntotutkimuksen tarkoituksena on selvittää kohteen sen hetkinen kunto, mahdolliset vauriot ja niiden syyt sekä eteneminen ja löytää sopiva korjaustoimenpide (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2013). Riittävän varhaisessa vaiheessa suoritetun kuntotutkimuksen perusteella voidaan valita vaurioitumista hidastavia tai vaurioitumisen etenemisen

lopettavia huolto- ja korjausmenetelmiä sekä mahdollisesti jopa välttää kalliit ja suuret korjaukset. Säännöllisesti suoritettuna kuntotutkimukset antavat ajankohtaista ja tarpeellista tietoa myös tulevista korjauksista, joka mahdollistaa korjauskustannuksiin varautumisen (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2014). Korjausten myöhästymisen seurauksena korjauskustannukset nousevat verrattuna oikeaan aikaan suoritettuihin korjaustoimiin. Riittävän pitkälle edenneiden vaurioiden korjaaminen voi tulla kohtuuttoman kalliiksi, jolloin pahimmassa tapauksessa ainoaksi vaihtoehdoksi jää purkaminen (Kuva 3).



Kuva 3. Kaivinkoneet purkamassa siltaa, joka todettiin liian huonokuntoiseksi ajokaistan lisäämistä varten. (Kuva Antti Autere)

## **2. BETONIN MUODOSTAVAT OSA-AINEET**

### **2.1 Kiviaine**

Kiviaineen, eli runkoaineen osuus betonin tilavuudesta on noin 65 – 80 %. Suuren osuutensa vuoksi kiviaineen laadulla ja ominaisuuksilla on tärkeä merkitys betonin



ominaisuuksiin. Käytettävä kiviaine voi olla miltei mikä vain riittävän luja, tiivis ja rakeinen materiaali. Se ei kuitenkaan saa osallistua sementin kovettumisreaktioihin tai vaikuttaa huonontavasti betonin säilyvyyteen. Kiviaineen tulisi olla helposti saatavissa ja sen kustannukset eivät saa olla suuret johtuen sen määrällisesti suuresta tarpeesta betonin valmistuksessa (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2004). Luonnon kiviaineen tai murskatun kallion lisäksi kiviaineeksi käyvät myös keino-, uusio- ja kierrätyskiviaine (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2016).

Luonnonkiviaine saadaan lajittelemalla kivennäismaalajeista tai murskaamalla kalliosta. Murskaamattoman ja betonin valmistukseen sopivan luonnonkiven saaminen saattaa olla usein vaikeaa, joten murskatun kiviaineen käyttö on lisääntynyt viimeisten vuosikymmenien aikana etenkin Etelä-Suomessa. Kiviaineen hankintaa vaikeuttaa monissa tapauksissa myös kuljetusmatkan pituus. Luonnonkiviaineesta Suomessa yleisimmin käytetyt kivilajit ovat granitoidit, jotka ovat usein murskattu. Betonimurskeen käyttö kiviaineena on yleistynyt. Lentotuhkalla voidaan parantaa rakeisuuden jakautumista raekokokäyrän hienommassa päässä, eli sitä käytetään fillerinä. Raskaammat kivilajit ovat tarpeellisia sellaisissa tapauksissa, joissa betonilta vaaditaan erityisiä ominaisuuksia esimerkiksi kulutuskestävyydeltä. Tällaisia kohteita ovat muun muassa tiebetonit. (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2004)

Betonin kiviaineen tulee olla ominaisuuksiltaan sopivaa. Se ei saa olla helposti rapautuvaa, huokoista tai haurasta, eikä se saa myöskään sisältää sellaisia määriä haitallisia aineita, että ne vaikuttavat tuoreen tai kovettuneen betonin ominaisuuksiin huonontavasti. Haitallisia aineita ovat esimerkiksi epäpuhtaudet ja savet. Kiviaineessa ei myöskään saa olla teräksiin vaikuttavia aineita, kuten sulfaatteja. Suomalainen kiviaines on yleensä sopivaa käytettäväksi betonissa. (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2004)

### *2.1.1 Rakeisuus*

Rakeisuudella tarkoitetaan seulomalla lajitellun kiviainenäytteen kaikkien raekokojen keskinäisiä painosuhteita. Se siis kuvaa näytteen rakeiden kokoa ja jakaamaa. Betonissa käytettävälle kiviaineelle on esitetty erilaisia ihanteellisia rakeisuuskäyriä, mutta yhtä tiettyä ei voida pitää ainoana oikeana. Hyvää betonia voidaan valmistaa sekä jatkuvilla että epäjatkuvilla rakeisuuskäyrillä. Rakeisuuden suunnittelussa pyrkimyksenä kuitenkin

on valita sellainen raejakauma, jossa rakeet pakkautuvat tiiviisti. Tiiviiseen massaan jää vain vähän tyhjää tilaa täytettäväksi sementtiliimalla. (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2004)

Rakeisuuden lisäksi betonin lujuuteen, tiiviyyteen ja työstettävyyteen vaikuttavat käytettävän kiviaineen raemuoto ja puhtaus. Esimerkiksi sopivassa määrin jauheena ollessaan hienoaines voi parantaa betonin ominaisuuksia, mutta paakkuisena tai isompien rakeiden pinnoille jääneenä se heikentää betonia. (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2004)

Betonin valmistuksessa maksimiraekooksi pyritään valitsemaan valettavan rakenteen koko ja raudoitusten tiheys huomioon ottaen mahdollisimman suuri maksimiraekoko. Näin sementtiliiman määrä saadaan pidettyä mahdollisimman pienenä, joka vähentää halkeilua, virumaa ja kutistumaa rakenteessa. Yleisimmät betonin valmistamisessa käytetyt kiviaineen raekoot ovat 8, 12 ja 32 millimetriä. (Rakentaja.fi 2012)

### *2.1.2 Kiviaineen raemuoto*

Kiviaineen raemuoto vaikuttaa tuoreen betonin muovailtavuuteen sekä osin myös kovettuneen betonin ominaisuuksiin. Sileäpintainen ja pyöristynyt kiviaine vaatii vähemmän sementtiliimaa kuin karkeapintainen ja kulmikas kiviaine. Erityisesti betonin kovettumisen varhaisessa vaiheessa kulmikas ja karkeapintainen kiviaine vaikuttaa betonin lujuuteen parantaen sitä, koska tartunnat sementin kanssa ovat paremmat. Myöhemmässä vaiheessa, kun sementissä tapahtuvien reaktioiden muodostamat sidokset ovat syntyneet, ei ero kiviaineen raemuodossa ole yhtä merkittävä tekijä lujuuden kannalta. Tämä johtuu myös osin siitä, että kiviaine on betonin osa-aineista lujinta. Poikkeuksena kuitenkin jotkin erittäin huokoiset ja heikot kiviainekappaleet. (Mehta 2001)

Kiviaineen koko ja muoto voivat vaikuttaa betonin lujuuteen epäsuorasti. Suurikokoiset kiviainekappaleet tai pitkulaiset ja litteät kappaleet voivat heikentää betonin lujuutta niiden pinnoilla tapahtuvan vedenerottumisen kautta, jolloin pastan ja kiviaineen väliset tartunnat jäävät heikoiksi. (Mehta 2001)

Kiviaineen rakeiden muotoa voidaan kuvata termeillä kulmikas, pitkulainen tai litteä. Rakeiden pyöristyneisyyttä voidaan puolestaan kuvata termeillä särmikäs,

pyöreäsärmäinen tai pyörästynyt. Pinnan tekstuuri luokitellaan silmämääräisen arvion perusteella sileäksi tai karkeaksi. Luonnon kiviaines on usein pyörästynyttä ja murskattu kiviaines on puolestaan särmikästä, mutta kaikkia raemuotoja ja pyörästyneisyyden eri muotoja esiintyy. (Mehta 2001)

## **2.2 Vesi**

Betonin valmistamiseen sopii hyvin vesijohtoverkon vesi tai juomakelpoinen luonnonvesi. Teollisuuden tai kotiteollisuuksien saastuttamat vedet ja soiden humuspitoiset vedet eivät sovellu betonin valmistukseen ilman tutkimuksia. Suovedet sisältävät usein humuksen lisäksi sulfideja ja sulfaatteja sekä ovat happamia. Huonoimmassa tapauksessa nämä voivat jopa kokonaan estää betonin kovettumisen. Veden kloridipitoisuus ei yleensä saa ylittää 0,03 painoprosenttia. Edellä mainittujen tekijöiden lisäksi betonointiin käytettävä vesi ei saa vaahdota ja se ei saa myöskään sisältää leviä tai muita pieneliöitä. (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2004)

## **2.3 Sementti**

Sementti on hydraulinen sideaine. Veden kanssa reagoidessaan se muodostaa sementtipastan, joka kovettuu ja säilyttää lujuutensa myös vedessä. Se vaikuttaa merkittävästi betonin ominaisuuksiin, kuten muovailtavuuteen ja säilyvyyteen. Tietynlaisen sementin käytöllä voidaan vaikuttaa betonin lujuuteen, lämmönkehitykseen sekä kemialliseen kestävytyteen. Pääraaka-aineena sementissä on kalkkikivi, joka muodostuu kalsiumkarbonaatista ( $\text{CaCO}_3$ ). Muut sementin valmistukseen tarvittavat osat ovat piidioksidi ( $\text{SiO}_2$ ), rautaoksidi ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ja alumiinioksidi ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), jotka saadaan usein kalkkilouhoksen sivukivestä sekä teollisuuden sivutuotteista. (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2004)

Sementin valmistuksessa kalkkikivi murskataan ja murskeeseen lisätään portlandklinkkerin muut osa-aineet, kuten hiekka ja kuona. Tässä vaiheessa lisätään myös kalsiumsulfaattia yleensä kipsinä, jolla säädellään sementin sitoutumisaikaa. Kalkkikiven ja osa-aineiden seos jauhetaan hienoksi jauheeksi, jonka jälkeen se poltetaan. Kalsiumkarbonaatti hajoaa 900 °C lämpötilassa muodostaen kalsiumoksidia ja

hiilidioksidia. Kun lämpötila saavuttaa 1400 °C, sintraantuu kalsiumoksidi piin, raudan, alumiinin ja muiden yhdisteiden kanssa sementtiklinkkeriksi. Päämineraaleina (Taulukko 1) muodostuneessa portlandklinkkerissä ovat aliitti ( $3 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ,  $\text{C}_3\text{S}$ ), beliitti ( $2 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ,  $\text{C}_2\text{S}$ ), aluminaatti ( $3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{C}_3\text{A}$ ) sekä ferriitti ( $4 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{C}_4\text{AF}$ ). Sementin ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa muuttamalla edellä mainittujen neljän mineraalin määräsuhhteita. Polton jälkeen muodostunut portlandklinkkeri jäädytetään noin 200 °C lämpötilaan ja jauhetaan hienoksi sementiksi. Jauhatuksen aikana klinkkeriin lisätään haluttuja seosaineita, kuten kalkkikiveä, lentotuhkaa tai masuunikuonaa. Eri seosaineita lisäämällä ja määräsuhhteita muuttamalla saadaan valmistettua samasta sementtiklinkkeristä eri sementtilaatuja. (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2004)

Taulukko 1. Klinkkerimineraalit, niiden kemialliset kaavat, lyhenteet ja nimet.

Klinkkerimineraali	Kemiallinen kaava	Lyhenne	Nimi
Trikalsiumsilikaatti	$3 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$	Aliitti
Dikalsiumsilikaatti	$2 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$	Beliitti
Trikalsiumaluminaatti	$3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$	Aluminaatti
Tetrakalsiumaluminaatti-ferriitti	$4 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$	Ferriitti

### 2.3.1 Sementtityypit

Sementtistandardissa SFS-EN 197-1 eritellään sementit viiteen eri päälajiin koostumuksesta riippuen. Nämä sementtien päälajit ovat portlandsementti, portlandseossementti, masuunikuonasementti, pozzolaanisementti ja seossementti. Edellä mainitut päälajit voidaan jakaa vielä seosaineiden ja niiden määrien perusteella erilaisiin sementtilajeihin, joita standardissa on kaikkiaan 27. Seosaineiksi standardissa luetaan masuunikuona, kalkkikivi, silika, pozzolaanit, lentotuhka sekä poltettu liuske. (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2004)

Suomessa on yleisesti käytössä viisi erityyppistä rakennussementtiä. Yleissementti sopii yksinkertaisiin ja erikoisvaluihin. Rapidsementti on nopeasti kovettuvaa ja sitä käytetään sekä valmisbetoneissa että betonielementeissä. Se sopii myös talvibetonointiin. Pikasementti on suosittua nopean kovettumisensa takia elementtiteollisuudessa,

talvibetonoinnissa sekä korkealujuusbetoneissa. SR-sementti kovettuu normaalilla nopeudella, mutta se soveltuu erityisesti rakenteisiin, joihin kohdistuu sulfaattirasitusta. Valkosementti valmistetaan klinkkeristä, jossa ei ole juuri lainkaan rautaa, jolloin sementistä saadaan valkoista. Sen lujuusominaisuudet ovat hyvät. Usein valkosementin käyttökohteena ovat julkisivut. (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2004)

## **2.4 Lisäaineet**

Suhteituksella, eli betonin eri osa-aineiden valinnalla ja seossuhteilla, voidaan vaikuttaa betonin ominaisuuksiin sekä parantaa sen taloudellista kilpailukykyä. Betonin ominaisuuksia kuten sitoutumista, kovettumista ja kovettuneen betonin ominaisuuksia voidaan säätää myös lisäaineilla, jotka vaikuttavat joko kemiallisesti tai fysikaalisesti. Muihin betonin osa-aineisiin verrattuna seosaineiden osuus massasta on hyvin pieni. (Suomen Betoniyhdistys r.y.2018)

Lisäaineiden käyttö helpottaa merkittävästi esimerkiksi pakkasenkestävän- ja korkealujuusbetonin valmistamista. Niiden turvallinen käyttö vaatii kuitenkin ennalta suoritettuja tutkimuksia johtuen mahdollisista sivuvaikutuksista. Esimerkkinä sivuvaikutuksista ovat joidenkin notkistimien vaikutukset sitoutumisreaktioihin etenkin, kun olosuhteet ovat kylmät. Joissain tapauksissa myös notkistimien ja huokostimien toiminta yhdessä on epävarmaa. Lisäaineiden toimintaan vaikuttavat myös lisäaineen määrä, betonin sementtilaatu sekä sementin määrä, kiviaineen koko, muut käytetyt lisäaineet ja niiden lisäämisjärjestys sekä lämpötila. (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2004)

### *2.4.1 Notkistimet*

Notkistimet ovat pinta-aktiivisia lisäaineita, joiden tarkoitus on toimia sementin ja veden välillä parantaen betonin teknisiä ominaisuuksia sekä taloudellisuutta. Niitä käyttämällä saavutetaan parempi pumpattavuus ja koossapysyvyys. Myös käytettävää sementti- ja vesimäärää voidaan vähentää. Notkistimet mahdollistavat korkealujuusbetonien valmistamisen. (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2004)

Notkistimet luokitellaan ryhmiin tehokkuutensa mukaan. Niiden avulla saadaan vähennettyä 5-15 % vaadittavasta vesimäärästä huonontamatta betonin muokattavuutta. Tehonotkistimilla vaadittavan veden määrä vähenee 12-30 %. Notkistavia lisäaineita sekoitetaan massaan noin 1-1,5 % sideaineen määrästä, mutta määrä voi olla myös enemmän riippuen notkistimesta. Vaikutusajat vaihtelevat aina 15 minuutista tunteihin. Notkistimet ovat nykyisin hyvin usein polykarboksylaattipohjaisia. (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2004)

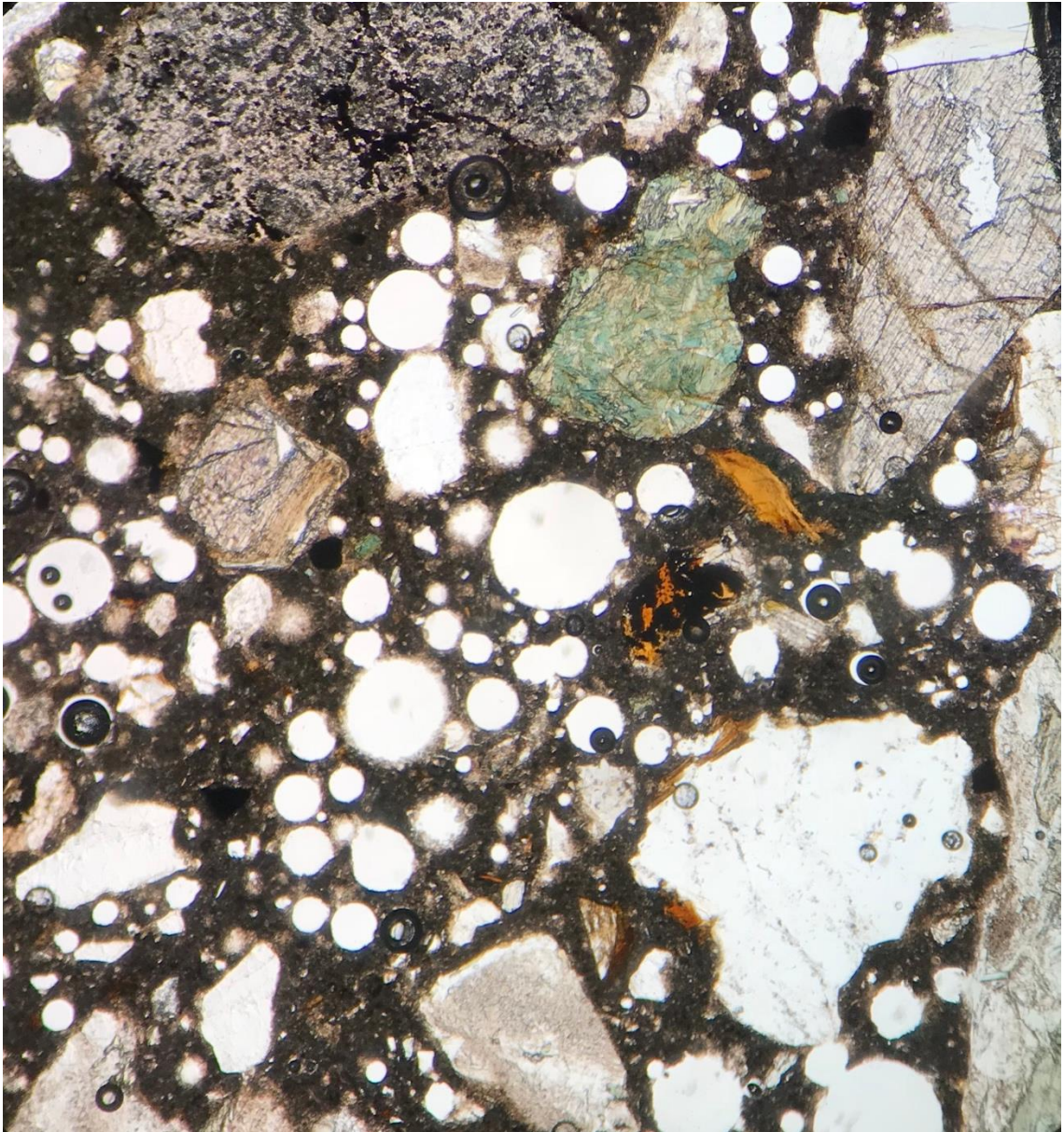
#### *2.4.2 Huokostimet*

Perinteisessä tapauksessa ilman osuus betonissa on 1-2 %, korkealujuusbetoneissa vähemmän. Betonin pakkasenkestävyys perustuu huokostuksella saataviin suojahuokosiin, jolloin ilman osuus betonissa voidaan kasvattaa luokkaan 4-8 %. Huokostimet muodostavat tiivistyshuokosia pienempiä pyöreitä suojahuokosia, jotka leviävät betoniin. Betonissa olevan veden jäätyessä syntyvä paine siirtyy suojahuokosiin, jolloin betoniin ei synny vaurioita. Jotta suojahuokokset toimivat mahdollisimman tehokkaasti, tulee niiden olla kooltaan sopivia ja suojahuokosten välimatkat eivät saa olla liian pitkät. (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2004)

Huokostavia lisäaineita sekoitetaan massaan vain 0,01-0,03 % sideaineen määrästä. Pakkaskestävyyden parantumisen lisäksi huokostimet vaikuttavat betonimassan muokattavuuteen parantaen notkeutta ja koossapysyvyyttä. Myös betonimassan eri osain erottuminen vähenee. Toisaalta kovettuneen betonin lujuus heikkenee karkeasti arvioiden 5 % kun ilmaa lisätään yksi prosenttiyksikkö. (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2004)

Huokostamisen onnistumista on hankala arvioida juuri valetusta betonimassasta, koska ilmapitoisuuden määrittäminen ei kerro huokosten kokoa ja jakautumista. Osa notkistimista aiheuttaa lisää ilmaa betoniin. Näin muodostuneet huokokset ovat liian suuria suojahuokosiksi ja saattavat muodostaa onteloita betoniin, jolloin pakkasenkestävyys ei parane. Notkistimien ja huokostimien yhteiskäytössä on havaittu ongelmia, joissa notkistimet eivät salli huokosten muodostumista tai ne ajavat huokokset pois betonista. Sopivien notkistin- ja huokostintyyppien valinnoilla ongelmat voidaan kuitenkin välttää.

Huokostuksen onnistumista voidaan tutkia mikroskoopilla joko ohuthieestä tai pintahieestä (Kuva 4). (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2004)



Kuva 4. Pyöreitä suojahuokosia sillan reunapalkista poratussa betonissa. Huokostuksen onnistumista tutkitaan ohuthienäytteistä. Kuvan pidemmän sivun pituus luonnossa on noin 2 mm. (Kuva Antti Autere)

#### 2.4.3 Hidastimet

Hidastimet ovat lisäaineita, jotka nimensä mukaisesti hidastavat betonin sitoutumista. Ne ovat tarpeellisia esimerkiksi tilanteissa, joissa betoni joudutaan kuljettamaan pitkän matkan takaa, halutaan välttää työsaumojen muodostumista tai lämpimällä säällä halutaan pidentää betonimassan muokkausaikaa. (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2004)

Hidastimen määrään suhteessa betonin määrään vaikuttavat lämpötila, sementti, seosaineet ja aika kuinka paljon sitoutumista halutaan siirtää. Usein hidastinta lisätään noin 1 – 3 % sideaineen määrästä. Kylminä vuodenaikoina hidastimien käyttö ei ole tarpeellista, sillä kylmä ilma hidastaa betonin sitoutumista. Betonin sitoutumisen alkamista voidaan lykätä myös hidastavilla notkistimilla. (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2004)

#### *2.4.4 Kiihdyttimet*

Tapauksessa, jossa betonin sitoutumista halutaan nopeuttaa, voidaan käyttää lisäaineena kiihdytintä. Tällaisia tilanteita ovat esimerkiksi nopea jäätymislajuuden saavuttaminen tai tarve saada purettua muotit nopeasti. Ennen yleisessä käytössä kiihdyttimenä oli kalsiumkloridi, mutta nykyisin sen käyttöä on pyritty vähentämään sivuvaikutuksista johtuen. Väärän kalsiumkloridin annostelun takia terästen ruostumisriski kasvaa ja betonin sitoutuminen voi hidastua. (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2004)

### **3. SEMENTIN JA VEDEN VÄLISET REAKTIOT**

#### **3.1 Hydrataatio**

Sementin tärkein ominaisuus on sen kyky reagoida veden kanssa muodostaen kovan ja veteen liukenemattoman materiaalin, jota kutsutaan sementtikiveksi (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2004). Reaktioiden sarjaa, joka alkaa portlandsementin ja veden sekoittuessa kutsutaan hydrataatioksi (Mehta 2001). Se on monimutkainen sarja reaktioita johtuen siitä, että portlandsementti koostuu useista veden kanssa reagoivista yhdisteistä (Virola ja Raivio 2000).

Reaktiot tapahtuvat sekä samanaikaisesti että toisiaan seuraten ja ovat myös toisistaan riippuvaisia (Virola ja Raivio 2000). Niiden nopeudet vaihtelevat. Aluminaattien tiedetään hydratoituvan huomattavasti nopeammin kuin silikaattien. Silikaattien rooli kovettumisessa on merkittävä, koska niiden osuus portlandsementissä on usein noin 75 % (Mehta 2001).



Ensimmäisenä portlandsementin ja veden sekoittumisen jälkeen reagoivat aluminaatit. Reaktion alku olisi välitön, mutta sen hidastamiseksi sementtiin lisätään kipsiä. Aluminaatit eivät vaikuta merkittävästi betonin lujuuteen, mutta ovat kuitenkin välttämättömiä varhaisreaktioiden vuoksi. Trikalsiumsilikaatti ( $C_3S$ ) ja dikalsiumsilikaatti ( $C_2S$ ) puolestaan muodostavat sementin lujuuden. (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2004)

Sementtikemiassa pidetään tärkeimpänä trikalsiumsilikaatin ( $C_3S$ ) hydrataatiota. Aliitti, eli epäpuhdas  $C_3S$ , on portlandsementin merkittävin osa. Sillä on suuri vaikutus portlandsementtipastan sitoutumiseen ja etenkin varhaislujuuden kehittymiseen. Veden kanssa reagoidessaan trikalsiumsilikaatti ( $C_3S$ ) sitoutuu ja kovettuu kuten portlandsementti. Reaktiotuotteina trikalsiumsilikaatin hydrataatiossa muodostuu kalsiumsilikaattihydraattia (C-S-H) sekä kiteistä kalsiumhydroksidia. C-S-H-faasi on amorfista tai lähes amorfista ja ominaisuuksiltaan se on kuin jäykkä geeli. Muodostunut huokoinen sementtipasta on amorfisista ja kiteisistä hydrataatiotuotteista koostuva seos. Dikalsiumsilikaatin ( $C_2S$ ) hydrataatioreaktio on samanlainen kuin trikalsiumsilikaatin, mutta hitaampi. Reaktiotuotteina muodostuu enemmän kalsiumsilikaattihydraattia ja vähemmän kiteistä kalsiumhydroksidia kuin trikalsiumsilikaatin hydrataatiossa. 28 vuorokauden aikana noin 70 % trikalsiumsilikaatista on reagoinut ja vuoden aikana käytännöllisesti kaikki. Vastaavasti dikalsiumsilikaatista noin 30 % reagoi ensimmäisen 28 vuorokauden aikana ja noin 90 % ensimmäisen vuoden aikana. (Virola ja Raivio 2000)

C-S-H-faasin rakenne ei ole täysin tiedossa. Sen nanorakenteesta löytyy kuitenkin samankaltaisuuksia kuin kiteisistä jenniitti- ja tobermoriittifaaseista. C-S-H-faasista on tunnistettu hydrataation aikana monia morfologiatyyppejä. Se voi esiintyä kalvomaisena, kuitumaisena, hiutalemaisena, kennomaisena, verkkomaisena, tiiviisti pakkautuneina rakeina tai piirteettömänä tiheänä materiaalina. Hydrataation alussa materiaali esiintyy kuituisena tai kalvomaisena muuttaen muotoaan ja lopulta ollen tiivistä ja piirteetöntä hydrataation edetessä loppuun. (Virola ja Raivio 2000)

### 3.2 Mikrorakenteen syntyminen

$C_3S$ :n ja sementtipastojen mikrorakenteet muodostuvat pitkälti samalla tavalla, mutta mikrorakenteiden muodostumisessa on myös eroja. Mikrorakenteen muodostuminen voidaan jakaa kolmeen vaiheeseen, joiden aikarajat ovat kuitenkin vain karkeita ja voivat vaihdella.

Varhaisvaiheessa (0-3 tuntia) välittömästi sementin ja veden sekoittamisen jälkeen sementtirakeiden pinnoille alkaa muodostua geelimäinen kerros (Groves 1981, Dalgleish et al. 1982a). Geelimäinen kerros koostuu alumiini- ja piioksidista, kalsiumista sekä sulfaatista. Sen koostumus kuitenkin vaihtelee alla olevasta sementtirakeen pinnasta riippuen. Rakeiden pinnoilla ja niiden lähellä olevissa nestefaaseissa on havaittu sauvamaista AFt-faasia noin 10 minuuttia hydrataation alkamisen jälkeen (Dalgleish 1982a, Dalgleish et al. 1982b). Varhaisvaiheessa reaktiotuotteet siis eroavat trikalsiumsilikaatin hydrataation reaktiotuotteista, jotka ovat kalvomaisia tai kennomaisia (Taylor 1997).

Keskivaiheessa (3-24 tuntia) tapahtuu nopeaa C-S-H-faasin ja  $Ca(OH)_2$ :n muodostumista. Aluksi C-S-H-faasin morfologia on kalvomainen, mutta muuttuu kuivumisen johdosta kuitumaiseksi (Pratt ja Ghose 1983, Dalgleish et al. 1982b). Mikäli ympärillä ei ole riittävästi tilaa kuitumaiselle rakenteelle, muuttuu C-S-H-faasi verkko- tai kennomaiseksi. Sementtirakeen ympärille muodostuu paksuuntuva C-S-H kerros, jonka sisälle jää AFt-sauvoja. C-S-H kerrokset paksuuntuvat ja noin 12 tunnin kuluttua niiden paksuudet ovat luokkaa 0,5 – 1,0  $\mu m$ . Vierekkäisiä rakeita peittävät kerrokset alkavat yhdistyä, jolloin koheesiopiste on saavutettu. Tässä vaiheessa myös lämmöntuotto on suurimmillaan ja sementtipastan sitoutuminen päättyy. Veden täyttämät huokostilat umpeutuvat kalsiumhydroksidikiteillä. Keskivaiheen loputtua 30 % sementtirakeista on hydratoitunut (Taylor 1997).

Myöhäisvaiheessa (yli 24 tuntia) hydraattikehät alkavat paksuuntua. Paksuuntumisen seurauksena niiden läpäisevyys heikkenee ja aliitin jatkuvasti käynnissä oleva reaktio aiheuttaa C-S-H-faasin muodostumisen hydraattikehän sisäpuolelle. Rakeen pinnan ja sitä ympäröivän kehän väli pienenee. Rakeen ollessa riittävän suuri ja hydrataation saavuttaessa 7 päivän keston, häviää väli kokonaan (Schriverer 1989). Aluminaattifaasi

puolestaan reagoi muodostaen AFt-faasia ja sulfaattikonsentraatio kehän sisällä olevassa nesteessä pienenee. Tästä johtuen aluminaattifaasi reagoi kehän sisäpuolella olevan AFt-faasin kanssa. Tästä muodostuu reaktiotuotteena AFm-faasia, joka on heksagonaalista (Virola ja Raivio 2000).

Edellä kuvattu mikrorakenteen muodostuminen esittää yksittäisten sementtirakeiden ympärillä tapahtuvia reaktioita hydrataation edetessä. Yleiset tekijät, jotka vaikuttavat hydratoituvan sementtipastan mikrorakenteeseen ovat sementin raekoko, hydrataatioaste ja vesi-sementtisuhte. (Schriener 1989)

### **3.3 Sementin sitoutuminen, kovettuminen ja lujuuden kehitys**

Veden ja sementin seos on sekoituksen jälkeen notkeaa. Plastisuus johtuu seoksessa olevasta vapaasta vedestä. Seos alkaa kuitenkin menettää plastisuuttaan jonkin ajan kuluttua sekoituksesta, koska vapaata vettä poistuu alkuvaiheen hydrataatiossa, ettringiittikiteiden ja C-S-H:n kiteytyessä sekä veden haihtumisessa. Sementin plastisuuden menettämistä ja kiinteyden lisääntymistä kutsutaan sitoutumiseksi. Tuoreella, vasta sitoutuneella sementillä ei ole vielä juurikaan lujuutta, koska trikalsiumsilikaatin hydrataatio on vasta alkanut. Kun C<sub>3</sub>S alkaa hydratoitua, kestää prosessi useita viikkoja. Sementtipastassa olevien huokostilojen täyttyminen reaktiotuotteilla etenee, jolloin huokoisuus pienenee ja sementin lujuus kasvaa. Tätä kutsutaan lujuuden kehittymiseksi eli kovettumiseksi. Reaktio alkaa, kun sitoutuminen loppuu ja jatkuu siihen asti, kun vettä on hydrataation käytössä. Lujuudenkehitys on siis vahvasti riippuvainen vesi-sementtisuhteesta. (Mehta 2001, Suomen Betoniyhdistys r.y. 2004)

Sementin sitoutumisaika on riippuvainen sen kemiallisesta koostumuksesta ja hienoudesta sekä lämpötilasta. Sitoutumisaikaa voidaan säätää lisäämällä sementtiin kipsiä. Lämpötilan vaikutus sementin sitoutumiseen on merkittävä. Sitoutumisaika puolittuu lämpötilan noustessa 10 °C. Kylmissä olosuhteissa sementin sitoutuminen on hidasta, joten vaihtoehtoina on käyttää nopeasti kovettuvaa sementtiä tai lämmintä massaa. (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2004)

### 3.4 Lujuus

Lujuus testataan yleensä betonin ollessa 28 päivän ikäistä siitä huolimatta, että lujuudenkehitys jatkuu edelleen. Menetelmänä käytetään puristuslujuuden mittaamista ja lujuuden yksikkönä megapascalia (MPa). Puristuslujuutensa perusteella betonit jaetaan eri lujuusluokkiin. Lujuusluokka voidaan merkitä esimerkiksi K40, joka tarkoittaa 150 mm:n kuutiokoekappaleen lujuuden olevan 40 MPa. Betoniteollisuudessa valmistetaan eri lujuuksisia betoneita (Taulukko 2), jotka vaihtelevat usein K30 – K100 välillä. Lujuudeltaan K70 ja siitä ylöspäin olevia betoneita sanotaan korkealujuusbetoneiksi. Lujuusluokka voidaan ilmoittaa myös muodossa C35/45. Merkinässä C35 tarkoittaa standardilieriön puristuslujuutta 35 MPa ja 45 ilmaisee 150 mm kuution puristuslujuutta megapascaleina. (Finnsementti 2017)

Betonin vetolujuus on noin kymmenesosa sen puristuslujuudesta. Rakenteita harvoin mitoitetaan vetolujuuden mukaan, koska niissä esiintyvät jännitykset voidaan hoitaa raudoituksin. Rakenteen halkeilussa on aina kyse vetolujuuden ylittymisestä. Syynä voivat olla esimerkiksi lämpötilaeroista johtuvat sisäiset jännitykset. Teräsbetonirakenteissa halkeilua esiintyy miltei aina, joten niiden muodostuminen ja sijainti täytyy hallita. Näin voidaan taata rakenteen säilyvyys ja toiminta. (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2004)

Taulukko 2. Betonin lujuusluokat ja lujuusluokkia vastaavat ominaispuristuslujuus- ja ominaisvetolujuusarvot tavallista kiviainesta sisältävälle betonille (Tiehallinto 2006).

Lujuusluokka	Ominaispuristuslujuus MPa	Ominaisvetolujuus MN/m <sup>2</sup>
K100	70,0	3,9
K90	63,0	3,7
K80	56,0	3,5
K70	49,0	3,3
K60	42,0	3,1
K50	35,0	2,7
K45	31,5	2,5
K40	28,0	2,3
K35	24,5	2,1
K30	21,0	1,9

### 3.4 Huokostyyppit pienimmästä suurimpaan

Pienimpiä betonissa esiintyviä huokosia kutsutaan geelihuokosiksi. Niiden koko vaihtelee 0,001 – 0,002 mikrometrin välillä. Hyvin pienestä koostaan johtuen täytteenä oleva vesi ei pääse Suomen olosuhteissa yleensä jäätymään. (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2004)

Betonin vesi-sementtisuhde on yleensä yli 0,4, jotta betonimassaa on mahdollista työstää. Vesimäärästä johtuen sementtirakeiden väliin muodostuu vedellä täyttyneitä tiloja, eli kapillaarihuokosia. Näiden huokosten määrä on vahvasti riippuvainen käytetyn betonimassan vesi-sementtisuhteesta. Mikäli vesi-sementtisuhde on alle 0,4 ei kapillaarihuokosia esiinny betonissa, joka on täysin hydratoitunut. Jos vesi-sementtisuhde on alle 0,6, eivät kapillaarihuokokset muodosta jatkuvaa verkkoa. Tällöin myöskään veden kapillaarista liikettä ei pääse tapahtumaan. Kapillaarihuokokset ovat kooltaan yhden mikrometrin luokkaa ja niitä esiintyy eniten nuorissa ja suuren vesi-sementtisuhteen omaavissa betoneissa. Kapillaarihuokosten muodostumista vältetään, koska niitä pitkin betoniin päätyy heikentäviä aineita, kuten klorideja. (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2004)

Betonin pakkasenkestävyyden kannalta tärkeimpiä ovat suojahuokokset, joita saadaan muodostettua huokostimilla. Suojahuokokset ovat kooltaan 0,01 – 0,8 mm ja ne eivät täyty vedellä kapillaarisen imun takia. Huokosjako, eli suojahuokosten keskimääräisen etäisyyden puolikas tulee olla noin 0,2 mm, jotta jäätymisestä johtuva veden paineen kasvu aiheuttaa veden virtaamisen kapillaarihuokosista suojahuokosiin. Lämpötilan noustessa jäätynyt vesi sulaa ja virtaa takaisin kapillaarihuokosiin. Veden mahdollisuus liikkua kapillaari- ja suojahuokosten välillä on välttämätöntä betonin pakkasenkestävyyden kannalta. (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2018)

Tiivistyshuokosia muodostuu betoniin valamisen aikana. Otollinen paikka niiden muodostumiselle on muotin ja betonin rajapinta, koska betonin tärytyksen aikana ilma ja vesi kerääntyvät juuri sinne. Tiivistyshuokosten määrään vaikuttaa merkittävästi käytetty vesi-sementtisuhde. Mitä suurempi vesi-sementtisuhde on, sitä enemmän tiivistyshuokosia muodostuu. Pienellä vesi-sementtisuhteella saadaan aikaan tiivis ja luja betoni, jossa ei ole juurikaan tiivistyshuokosia. (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2004)

### **3.5 Haitalliset aineet**

Haitallisiksi aineiksi kutsutaan sellaisia aineita, jotka vaikuttavat betonin työstettävyyteen, kovettumiseen, säilymiseen tai muihin ominaisuuksiin. (Mehta 2001) Ne päätyvät betonimassaan kiviaineen mukana, joten kiviaineen puhtauden selvittäminen on tärkeää (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2004).

Suomessa kloridipitoisuus ei ole ongelmana etenäkään, kun käytetään sisämaan esiintymiä. Usein betonin ominaisuuksia heikentävät aineet ovat kasvi- ja eläinkunnan lahoamisjätettä, eli humusta. Pahimmillaan humus voi vaikuttaa merkittävästi kovettumisnopeuteen hidastaen tai jopa estäen sen kokonaan. Humuspitoisuus voidaan määrittää humuskokeella. (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2004)

Kiviaineessa tai vedessä oleva sokeri hidastaa betonin kovettumista tai jopa estää sen. Öljyllä on samanlaiset vaikutukset ja lisäksi se aiheuttaa ilmaa betoniin, joka vaikuttaa huokosten määrän kautta betonin lujuuteen. Hienojakoinen pii puolestaan voi aiheuttaa alkalipiireaktion sementin alkaliin kanssa, jolla on suoria rapauttavia vaikutuksia betoniin. Alkalipiireaktiota ei vielä jokin aika sitten pidetty ongelmana suomalaisen mekaanisesti ja kemiallisesti lujan kiviaineen kanssa, mutta tutkimustulosten perusteella asian tiedetään olevan toisin. (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2004, Pyy ja Holt 2010) Tästä johtuen on tärkeää tutkia alkalikiviainesreaktiota ja sitä aiheuttavia kivilajeja tarkemmin sekä osata tunnistaa sen esiintyminen (Pyy ja Holt 2010).

## **4. BETONIN MUUTTUMINEN JA VAURIOITUMINEN**

Betonirakenteissa voi esiintyä erilaisia muutoksia ja vaurioita säästä, olosuhteista ja rasituksesta johtuen. Muutokset ja vauriot heikentävät betonin ominaisuuksia ja aiheuttavat korjaustarvetta rakenteisiin. Yleisiä vaurioita ja vauriomekanismeja ovat teräskorroosio, betonin rapautuminen, kiinnitysten heikkeneminen, kosteuden aiheuttamat vauriot, verhoilun kuten tiilen ja klinkkerilaatan vauriot, betonin halkeilu ja käytöstä johtuva vaurioituminen. Vanhojen rakenteiden vaurioituminen on usein seurausta säärasituksesta, joka aiheuttaa betonin heikkenemistä, eli turmeltumista. Säärasitus aikaansaa useissa tapauksissa monia rinnakkaisia heikkenemistä aiheuttavia

prosesseja, eli vaurioituminen tapahtuu useiden prosessien tuloksena. Heikkenemisprosessit etenevät usein aluksi hitaasti, mutta nopeutuvat vaurioiden edetessä. Sisätiloissa sää-, kosteus- ja kemikaalirasitukselta välttyvät betonirakenteet vaurioituvat huomattavasti harvemmin ja vähemmän kuin säälle alttiit rakenteet. (Lahdensivu et al. 2015)

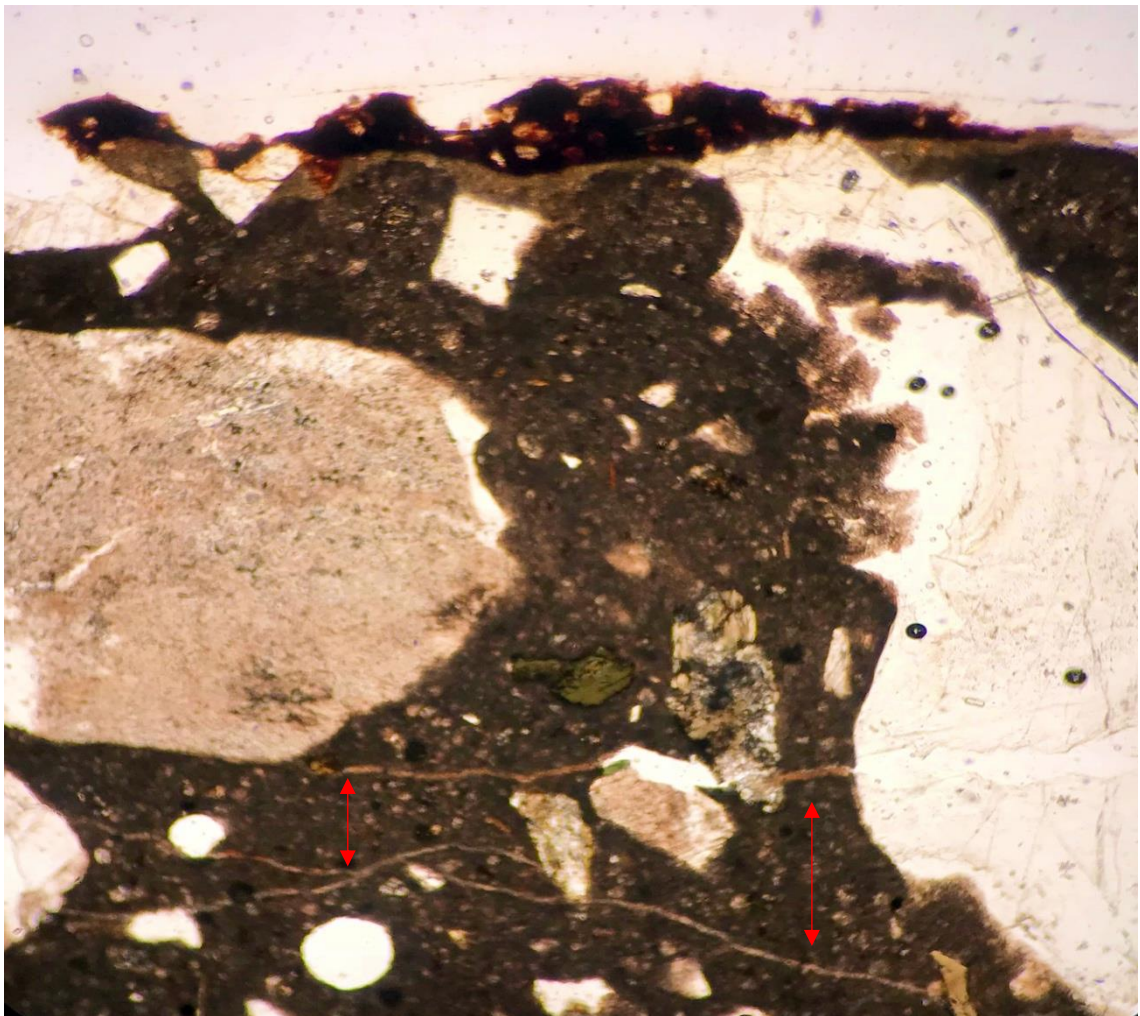
Rapautumiseksi kutsutaan sellaisia vaurioita, jotka aiheuttavat säröjä ja halkeamia betoniin. Ne jaetaan pinnalta rapautumiseen ja sisäiseen rapautumiseen. Rapautumisen edetessä betoni menettää lopulta lujuutensa ja koossapysyvyytensä. Vaikeille sääolosuhteille ja kosteusrasitukselle alttiina oleville betonirakenteille rapautumista aiheuttavat pakkasrapautuminen, ettringiitin kiteytyminen ja alkalikiviainesreaktio (Lahdensivu et al. 2015). Kemiallinen rasitus saattaa aiheuttaa betonin liukenemistä (Suomen betoniyhdistys r.y. 2018). Suomen oloissa yleisin mekanismi on pakkasrapautuminen, mutta myös ettringiittiä ja alkalikiviainesreaktiota tavataan (Kuva 5). Rapautuminen voi näyttää ulkoapäin samanlaiselta riippumatta sen mekanismista. Tämän takia syyn tutkiminen tuleekin suorittaa laboratoriossa (Lahdensivu et al. 2015). Seuraavassa keskitytään yleisimpiin ilmiöihin, joita tavataan yleisesti kuntotutkimusten yhteydessä.



Kuva 5. Pakkasrapautumisen aiheuttama pinnansuuntainen särö. Huokonen (merkitty paksummalla mustalla nuolella) ja sen lävistävä särö (merkitty punaisella nuolella) ovat täyttyneet ettringiitillä. Kuvassa keskellä olevan huokosen seinämille on kiteytynyt ettringiittiä (merkitty mustalla nuolella). Kuvan leveys luonnossa on noin 2 mm. (Kuva Antti Autere)

#### 4.1 Pakkasrapautuminen

Pakkasrasituksen aiheuttama betonin rapautuminen aiheuttaa lujuuden menetyksen, tilavuuden kasvun sekä pinnan halkeilun ja lohkeilun kautta läpäisevyyden kasvun (Kuva 6). Betonin huokosissa oleva vesi ei käyttäydy kuten vapaa vesi, vaan huokokset vaikuttavat veden käyttäytymiseen toistuvien jäätymisien ja sulamisien aikana. Syynä tähän on lämpötilavaihteluihin liittyvät veden fysikaaliset ja kemialliset ilmiöt, jotka liittyvät pintakemialliseen ja –fysikaaliseen käyttäytymiseen erityyppisissä huokosissa (Kuosa ja Vesikari, 2000). Jäätyminen seurauksena vesi siirtyy betonin huokosverkostoon. Veden jäätyminen ei tapahdu välittömästi lämpötilan laskiessa nollian alle, vaan ensin jäätyy vesi, joka on kookkaammissa gravitaatio- ja kapillaarihuokosissa. Vasta kun lämpötila saavuttaa noin  $-15$  -  $-20$  °C, alkaa pienemmissä adsorptiohuokosissa oleva vesi jäätyä (Pigeon ja Pleau 1995).



Kuva 6. Sillan kansilaatan yläpinnassa pakkasrapautumisen aiheuttamaa pinnansuuntaista säröilyä (merkitty punaisilla nuolilla). Kuvan leveys on luonnossa noin 4 mm. (Kuva Antti Autere)



Suurin pakkasrapautumisen aiheuttaja on kapillaarihuokosissa oleva, jäätyessään 9 tilavuus-% laajeneva vapaavesi, joka aiheuttaa painetta betoniin. Lämpötilan noustessa jääkide kasvaa taas, jolloin myös paine betonissa kasvaa entisestään. Pakkasrasitusta kuvataan yleisimmin hydraulisen paineen teorialla ja jääkiteen kasvun teorialla. Hydraulisen paineen teoriassa vaurioitumista tapahtuu, mikäli veden jäätymisestä johtuva tilavuudenkasvu ei pääse tapahtumaan vapaasti. Jääkiteen kasvun teoriassa taas jään huokosissa kiteytymisestä johtuva paine ylittää betonin vetolujuuden. (Kuva 7) (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2018)



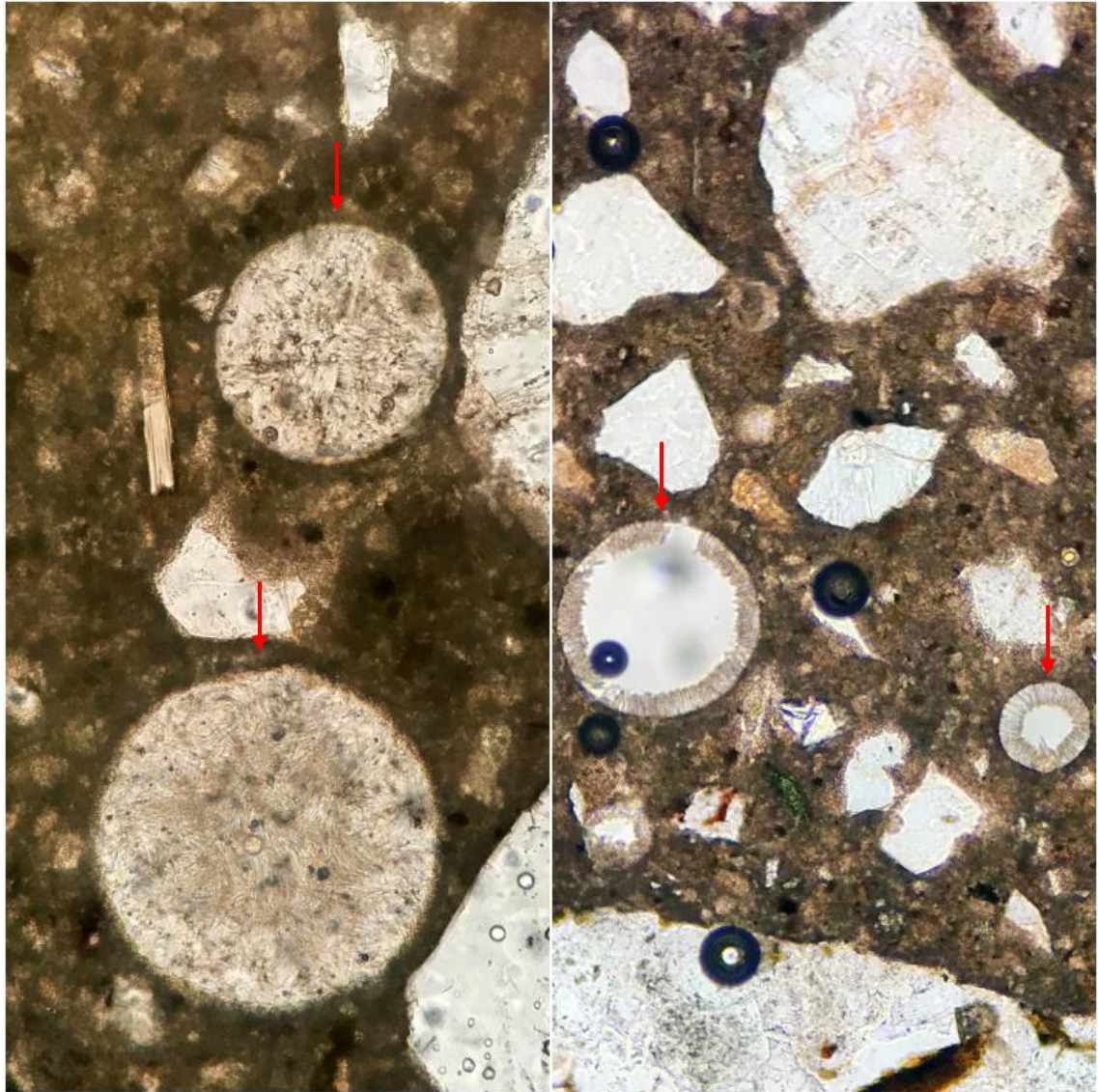
Kuva 7. Pakkasrapautumisen aiheuttamaa pinnansuuntaista säröilyä asuinkerrostalon julkisivusta poratussa näytteessä. Näytteen halkaisija on 55 mm. (Kuva Antti Autere)

Hydraulisen paineen teorian tukena on käytetty mikroskooppisten jäälinssien kasvun teoriaa. Sen kehittivät Powers ja Helmuth vuonna 1953. Teorian mukaan jäätymisestä johtuva huokoisen materiaalin vaurioituminen selittyy osin kapillaarihuokosiin kehittyvillä mikroskooppisilla jäälinssillä. Jäälinssit kasvavat kapillaarihuokosissa, koska veden kemiallinen potentiaali on niissä alhaisempi verrattuna geelihuokosiin. Jääkiteiden kasvu kapillaarihuokosissa aiheuttaa painetta huokosten seinämiin, koska niiden kasvulle ei ole riittävästi tilaa. Jääkiteiden kasvusta huokosten seinämiin aiheutuva paine johtaa lopulta huokosrakenteen vaurioitumiseen. (Powers ja Helmuth 1953)

Pakkasrapautuminen vaatii sopivat olosuhteet tapahtuakseen. Suotuisat olosuhteet ovat sellaiset, missä on runsaasti kosteusrasitusta ja lämpötila on alhainen sekä betonirakenne on sellainen, jossa sen kosteuspitoisuus on jäätymistilanteessa suuri (Lahdensivu et al. 2015). Pakkasrapautumista voidaan ehkäistä betonin huokostamisella ja sitä onkin käytetty 1970-luvun lopusta lähtien. Huokostamattoman ei-pakkasenkestävän betonin pakkasenkestävyys riippuu lähinnä käytetystä vesi-sementtisuhteesta (Pentti et al. 1998). Pienellä vesi-sementtisuhteella saadaan lujempaa ja tiiviimpää betonia, jolloin myös vähemmän vettä pääsee imeytymään betoniin. Näin jäätyvän veden määrä betonissa on pienempi. Huokostamatonkin betoni voi siis kestää pakkasrasituksen, mikäli se on hyvälaatuista (Lahdensivu et al. 2015).

## **4.2 Ettringiitti**

Ettringiittiä kiteytyy kovettuneen betonin sulfaattimineraalien kemiallisessa reaktiossa. Reaktiotuotteen, eli ettringiitin tilavuus on noin 130-140 % suurempi kuin lähtöaineiden (Deng ja Tang 1994). Sen esiintymistä voidaan tutkia ohuthieellä. Kiteytymistä tapahtuu ilmatäyteisten tiivistys- ja suojahuokosten sekä säröjen seinämille. Ettringiitin kiteytymisen myötä huokosten tilavuus pienenee, jolloin betonin pakkasenkestävyys huononee (Kuva 8). Pakkaskestävyyden huononemisen lisäksi ettringiitti voi rapauttaa betonia aiheuttamalla siihen painetta. Mikäli huokokset kiteytyvät umpeen, aiheuttavat kiteytymät painetta betoniin. Tämä saattaa johtaa säröilyn syntymiseen (Lahdensivu et al. 2015). Pakkasrapautumisen ja ettringiitin aiheuttamat vauriot muistuttavat vahvasti toisiaan, joten niiden erottaminen vaatii laboratoriotutkimuksia (Suomen betoniyhdistys r.y. 2013).



Kuva 8. Ettringiittiä kiteytyneenä huokosiin. Vasemmassa kuvassa huokokset ovat kiteytyneet umpeen. Oikeassa kuvassa ettringiittiä on kiteytynyt huokosten seinämille. Kiteytymät on merkitty kuviin nuoliilla. Huokosen umpeutuessa kiteytymällä aiheutuu betoniin painetta, joka saattaa johtaa säröilyn syntymiseen. Suojahuokosen umpeutuessa sen pakkasrapautumiselta suojaavat ominaisuudet katoavat. Vasemman kuvan pidemmän sivun pituus luonnossa on noin 1 mm. Oikean kuvan pidemmän sivun pituus luonnossa on noin 2 mm (Kuva Antti Autere)

Ettringiitin kiteytymiseen eli ettringiittireaktioon vaikuttavat betonin liiallinen lämpökäsittely kovettumisen aikana sekä vanhan betonirakenteen altistuminen pitkäaikaiselle ja voimakkaalle kosteusrasitukselle (Escalleidas et al. 2007). Lisäksi tarvitaan myös ulkoinen tai sisäinen sulfaattilähde (Collepari 1999). Mikrosäröjä pidetään ettringiitin kannalta merkittävänä tekijänä, koska niissä tapahtuu usein kiteytymistä. Mikrosäröilyä voi syntyä nopeiden lämpötilanmuutosten, kuivumiskutistuman tai ulkoisen kuormituksen takia. Vähäinen määrä ettringiittiä betonin huokosissa ei ole haitallista, mutta runsas kiteytyminen ja huokosten täyttyminen johtavat pakkasenkestävyyden menetykseen. (Lahdensivu et al. 2015)

### 4.3 Alkalikiviainesreaktio

Betonin kiviaineessa voi tapahtua alkalikiviainesreaktioksi (AKR) kutsuttu rapautumista aiheuttava paisumisreaktio, joka johtuu sementtikiven alkalisuudesta (Kuva 9). Alkalikiviainesreaktio vaatii tapahtuakseen kolme tekijää, jotka ovat alkalien runsas määrä sementissä, kiviaineessa olevien mineraalien heikko alkalisuudenkesto sekä betonin korkea kosteuspitoisuus. Lämpötilan nousu vaikuttaa alkalikiviainesreaktioon kiihdyttävästi (Punkki ja Suominen 1994).



Kuva 9. Alkalikiviainesreaktion aiheuttamaa säröilyä betonissa. Reaktion seurauksena on muodostunut geeliä, joka on paisunut ja aiheuttanut painetta betoniin. Tämän seurauksena on muodostunut suhteellisen voimakasta säröilyä, joka leikkaa kiviainetta. Säröissä on täytteenä alkalipiigeeliä. Säröt ovat osoitettu kuvassa nuolin. Kuvan pidemmän sivun pituus luonnossa on noin 2 mm. (Kuva Antti Autere)

Erityisen alttiita rakenteita runsaan kosteuden ja korkean lämpötilan takia ovat uimahallit ja kylpylät (Pyy ja Holt 2010). Muita kohteita, joissa alkalikiviainesreaktiota aika ajoin esiintyy ovat sillat, padot, perustukset ja pysäköintihallit (Kuva 10) (Punkki ja Suominen 1994, Gjörv 2009). Alkalikiviainesreaktio luokitellaan kolmeen ryhmään sen mukaan, mikä kiviaines reaktioon osallistuu: alkalipiidioksidireaktio, alkalisilikaattireaktio ja alkalikarbonaattireaktio (Gjörv 2009).



Kuva 10. Alkalikiviainesreaktiota sillasta irrotetussa kappaleessa. Kuvan leveys luonnossa on noin 5 cm. (Kuva Antti Autere)

Yleisin tyypeistä on alkalipiidioksidireaktio. Sitä tapahtuu betoneissa, joiden kiviaineessa on huonosti alkaleja kestäviä mineraaleja ja betonin huokosvedessä on natriumoksidia sekä kalsiumoksidia. Kemiallisessa reaktiossa muodostuu geeliä, joka imee runsaasti vettä itseensä. Geelin paisuessa, eli tilavuuden kasvaessa, huokosverkostoihin syntyy painetta. Riittävän suureksi kasvanut paine aiheuttaa betoniin sisäistä säröilyä (Kuva 11). (Neville 1995)



Kuva 11. Reagoanut kiviainekappale (merkitty punaisella nuolella) vasemmalla, josta alkaa mikrosärö. Reaktiotuote, eli alkalipiigeeli, on virrannut mikrosäröä pitkin huokoseen (merkitty mustalla nuolella) ja täyttänyt sen. Mikrosärö jatkuu huokosen läpi. Kuvan leveys luonnossa on noin 2 mm. (Kuva Antti Autere)

Alkalisilikaattireaktion reaktiomekanismissa on vastaavuuksia paisuvan alkalipiidioksidireaktion kanssa. Muodostuneen geelin fysikaalinen ja kemiallinen toiminta sekä muut reaktiotuotteet kuitenkin poikkeavat alkalipiidioksidireaktion reaktiotuotteista. Alkalisilikaattireaktiossa rapautuminen tapahtuu hitaasti. (Pyy et al. 2012)

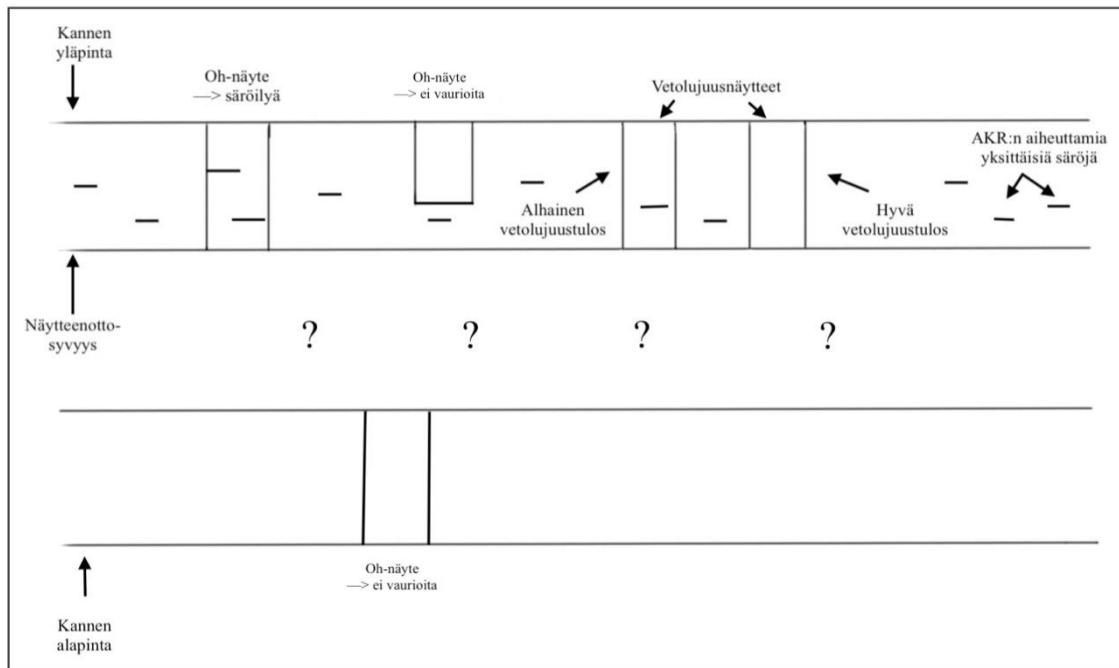
Alkalikarbonaattireaktio tapahtuu savea sisältävissä dolomiittikivissä hydroksyylin ja alkali-ionien välillä. Reaktiossa kalsiumkarbonaatti ja magnesiumkarbonaatti hajoavat samanaikaisesti betonin alkaliliuoksessa. Paisuminen tapahtuu erittäin nopeasti, jolloin betoniin aiheutuu voimakasta säröilyä. Säröilyä ei aiheuta geelin paisuminen vaan vettä imeneen saven paisuminen. (Pyy et al. 2012)

Alkalikiviainesreaktion aiheuttama rapautuminen on usein hidasta. Sen nopeuteen

vaikuttavat betonin kosteus, lämpötila, reagoiva kivilaji sekä sementti. Nopeimmillaan se tapahtuu noin 2-5 vuodessa betoneissa, joiden kivilajit sisältävät piitä. Hitaimmin reaktio tapahtuu hiekka- ja kalkkikiviä sisältävissä betoneissa, joissa aikaa kuluu 10-20 vuotta. Alkalikiviainesreaktiota on löydetty myös betoneista, joissa kiviaineena on käytetty vakaina pidettyjä kivilajeja kuten graniittia, kvartsiittia ja hiekkakiveä. (Gjørøv 2009)

Aluksi alkalikiviainesreaktion esiintymistä ei huomaa silmämääräisesti. Tarpeeksi pitkälle edettyään betonipinnassa voidaan havaita verkkomaista tai epäsäännöllistä halkeilua. Tällaisessa tilanteessa betonin sisällä tapahtunut reaktio on jo niin voimakas ja pitkälle edennyt, että halkeamat jatkuvat betonin pintaan asti. Halkeiluverkosto on vedelle ja klorideille suotuinen reitti kulkeutua syvemmälle betoniin. Näin ollen pakkasrapautumisen riski suurenee. (Pyy ja Holt 2010)

Ainoa keino alkalikiviainesreaktion luotettavaksi tunnistamiseksi on selvittää betonin koostumus ja rakenne ohuthietutkimuksella. Tutkimuksessa on erittäin tärkeää, että näytteet porataan riittävän syvältä (Kuva 12) tutkittavasta rakenteesta tai sen osasta. Tällä tavoin vältetään alkalikiviainesreaktion sekoittaminen pakkasrapautumiseen, koska kosteusliike voi liikuttaa muodostuneen geelin ulos betonista. (Pyy ja Holt 2010)



Kuva 12. Periaatekuva sillan kansilaatasta, jossa on alkalikiviainesreaktiota. Riittävällä näytemäärällä ja riittävän syväle ulotetulla näytteenotolla voidaan vaikuttaa alkalikiviainesreaktion löytymiseen. (Kuva Antti Autere)

#### 4.4 Teräskorroosio

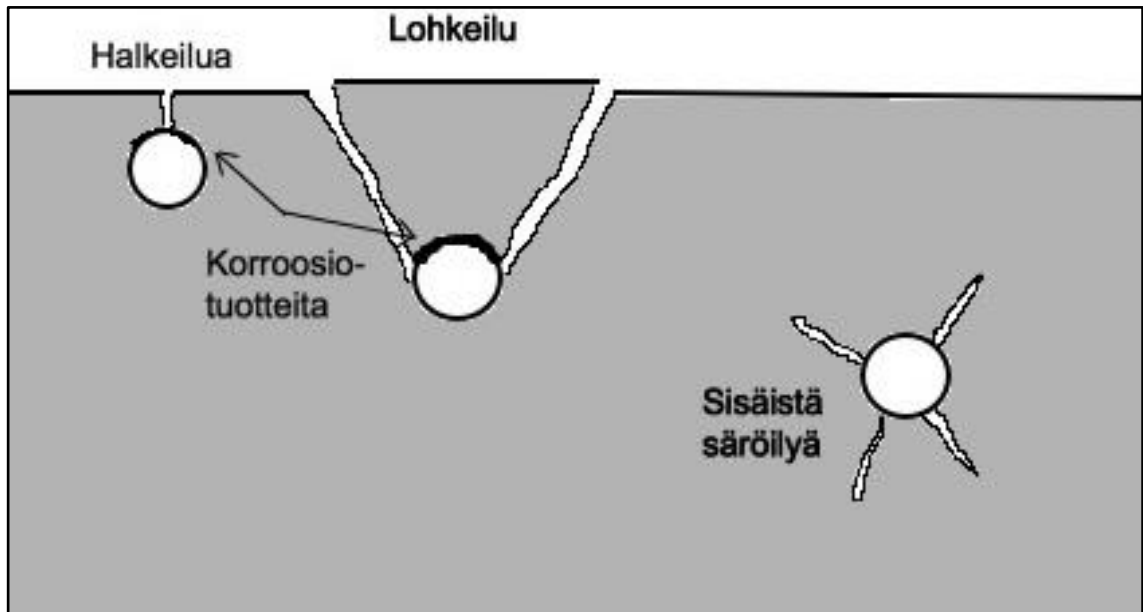
Vaurioitumattomassa ja hyväkuntoisessa betonissa teräkset ovat korroosiolta suojassa betonin alkalisuudesta johtuen. Betonin pH on 13 tai enemmän, mistä syystä terästen pinnoille syntyy korroosiota estävä passiivikalvo. Se korjaa itseään ja betonin tiiveys hidastaa happojen, kloridien ja sulfaattien pääsyn terästen pinnoille, jotka muutoin aiheuttaisivat korroosiota. Suoja on suhteellisen pysyvä, kun betoni on vaurioitumatonta ja hyväkuntoista (Parrot, 1987, Page 1988). Terästen korroosio voi kuitenkin käynnistyä, mikäli suojabetonin tiiviys tai paksuus ei ole riittävä tai kun passiivikalvo tuhoutuu kloridien tai karbonatisoitumisen takia (Kuva 13) (Bakker 1988, Gjörv 2009, Lahdensivu et al. 2015).



Kuva 13. Voimakkaasti ruostuneita teräksiä. Korroosiotuotteet kertyvät terästen pinnoille ja aiheuttavat painetta betoniin. Tämän seurauksena betoniin voi muodostua säröilyä ja lohkeilua. (Kuva Antti Autere)

Korroosiotuotteet ovat tilavuudeltaan 4 – 6 kertaa suurempia kuin alkuperäisten terästen tilavuus. Ne eivät ole vesiliukoisia, vaan kertyvät terästen pinnoille aiheuttaen painetta betoniin. (Lahdensivu et al. 2015). Paine saa aikaan muun muassa pinnan halkeilua ja lohkeilua sekä sisäisiä säröjä (Kuva 14) (Suomen betoniyhdistys r.y. 2004).





Kuva 14. Teräskorroosiossa muodostuvat korroosiotuotteet kertyvät terästen pinnoille ja aiheuttavat painetta betoniin. Paineesta johtuen betoniin syntyy vaurioita. (Mukaiiltu lähteestä Suomen betoniyhdistys r.y. 2018)

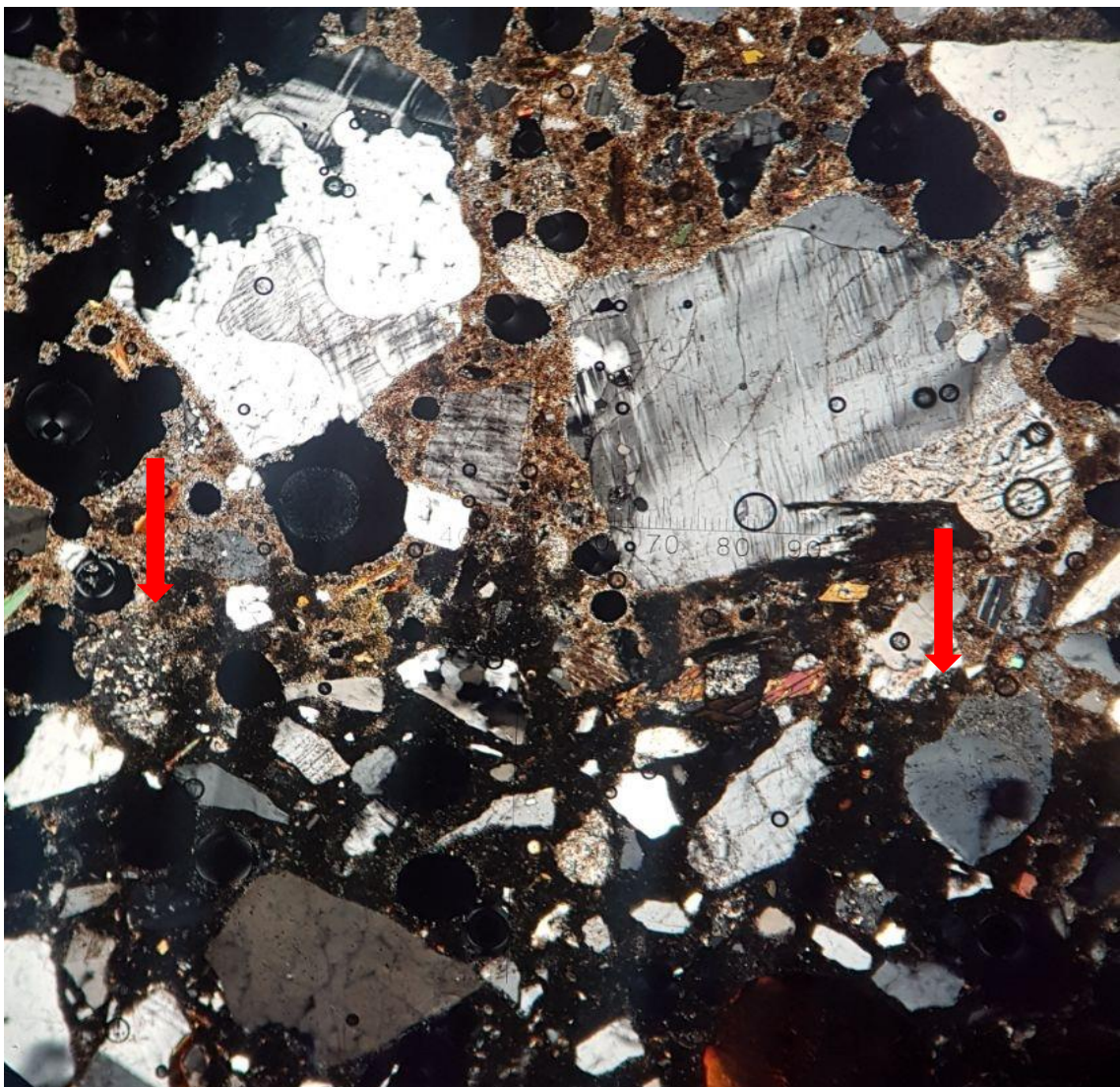
Teräskorroosio voi jatkua pitkäänkin, ennen kuin pinta rikkoutuu. Ensimmäisenä rikkoutumista ilmenee siellä, missä suojabetoni on paksuudeltaan vähäisintä ja kosteusrasitus on suurinta. Karbonatisoituneessa ja klorideja sisältävässä betonissa teräskorroosion nopeuteen vaikuttavat kosteuspitoisuus, lämpötila sekä kloridien määrä. (Lahdensivu et al. 2015)

#### 4.5 Karbonatisoituminen

Betonin neutraloitumisesta käytetään nimitystä karbonatisoituminen. Sen aiheuttaa betonissa olevien alkalisten yhdisteiden ja ilman hiilidioksidin väliset reaktiot, joista tärkein on alkalisen kalsiumhydroksidin ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ja happaman hiilidioksidin ( $\text{CO}_2$ ) välinen reaktio. Reaktiossa muodostuu kalsiumkarbonaattia, joka on neutraalia. (Lahdensivu et al. 2015)

Karbonatisoitumisesta johtuen betonissa olevan huokosveden pH alenee noin kahdeksaan, kun se ennen karbonatisoitumista on luokkaa 13-14. Ensimmäisenä karbonatisoitumista alkaa tapahtua betonin pinnassa, josta se etenee vähitellen (Kuva 15). Tästä johtuen on tärkeää, että betonin pinta on tiivis, eikä siihen muodostu halkeamia tai jää huonosti tiivistyneitä alueita. Karbonatisoituminen tapahtuu hitaasti. Syynä

etenemisen hitauteen ovat hiilidioksidin hidas tunkeutuminen huokosverkostoon, karbonatsoituvan materiaalin suuri määrä sekä hiilidioksidin vähäinen määrä ilmassa. Hiilidioksidin tunkeutumismuutoksen vaikuttavat myös betonin hyvä tiiviys, eli huokosten vähäinen määrä. Kosteus vaikuttaa hidastavasti hiilidioksidin tunkeutumismuutoksen. Huokoisuus on riippuvainen vesi-sementtisuhteesta ja hydrataatioasteesta. Kun vesi-sementtisuhte pienenee, kasvaa betonin tiiviys ja huokoisuus pienenee, jolloin karbonatsoitumisnopeus hidastuu. (Tuutti 1982, Parrot 1987, Bakker 1988)



Kuva 15. Karbonatsoituneen (vaalean) vyöhykkeen ja karbonatsoitumattoman (tumman) vyöhykkeen raja ohuthieessä. Raja on osoitettu kuvassa nuolin. Kuvan korkeus luonnossa on noin 4 mm. (Kuva Antti Autere)

Hiilidioksidin etenemistä betonissa hidastaa kosteus. Kosteuden hidastava vaikutus perustuu siihen, että huokosten ollessa vedellä täyttyneinä on hiilidioksidin hankalampi edetä betonissa (Bakker 1988). Sateelta suojassa olevat betonipinnat, kuten parvekelaatan

alapinnat, karbonatisoituvat noin kolmanneksen nopeammin kuin sateelle altistuvat betonipinnat. Voimakkaille sateille altistuvat pinnat puolestaan karbonatisoituvat keskiarvoa hitaammin. (Lahdensivu et al. 2015)

#### **4.6 Kloridit**

Kloridien haitallisuus perustuu siihen, että terästen pinnoille päästessään ne tuhoavat korroosiosuojauksen. Terästä suojaava passiivikalvo voi kadota jo pienilläkin kloridipitoisuuksilla, josta seuraa teräskorroosio. Kloridien aiheuttamissa teräskorroosiotapauksissa korroosiota tapahtuu myös alkalisessa karbonatisoitumattomassa betonissa. 0,03 p-% kloridipitoisuutta koko betonin painosta pidetään haitallisena pitoisuutena terästen kannalta (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2013). Raja ei ole kuitenkaan täysin tarkka, sillä haitallisen pitoisuuden määrään vaikuttavat monet asiat. Vaihtoehtoisiksi rajoiksi haitalliselle määrälle klorideja on ehdotettu muun muassa arvoja 0,17 – 2,5 p-% koko sementin painosta (Taylor et al. 1999, Alonso et al. 2000).

Betonirakenteisiin klorideja voi tunkeutua esimerkiksi teiden suolaamisessa, pölynsidontasuoloista ja meriveden roiskeista (Bakker 1988, Gjörv 2009). Voimakkaimmin näille altistuvat siltojen rakenteet. Betonijulkisivuissa ulkoisten tekijöiden vaikutukset ovat harvinaisia ja lähinnä paikallisia. Niissä on kuitenkin voitu käyttää betonimassan valmistuksen aikana klorideja kiihdyttämään kovettumista (Bakker 1988, Pentti et al. 1998, Gjörv 2009). Klorideja on käytetty 1960-luvulla kylminä aikoina työmaavaluissa ja myös valimoissa, mutta niiden käyttöön viittaavia pitoisuuksia on esiintynyt vielä 1980-luvun rakennuksissa. Kiihdyttämistarkoituksessa käytettyjen kloridien määrät ylittävät haitallisen rajan moninkertaisesti (Lahdensivu 2012).

#### **4.7 Halkeamat ja kutistumat**

Kutistuma johtuu betonin tilavuuden pienentymisestä. Sen voimakkuus on riippuvainen monesta tekijästä ja tyyppejä on useita. Syitä tilavuuden pienentymiseen ovat usein betonin kuivuminen sekä sementin hydrataatio. Tilavuuden pienentymisestä johtuen kutistuminen aiheuttaa vetojännitystä betonipintaan, josta on seurauksena pinnan

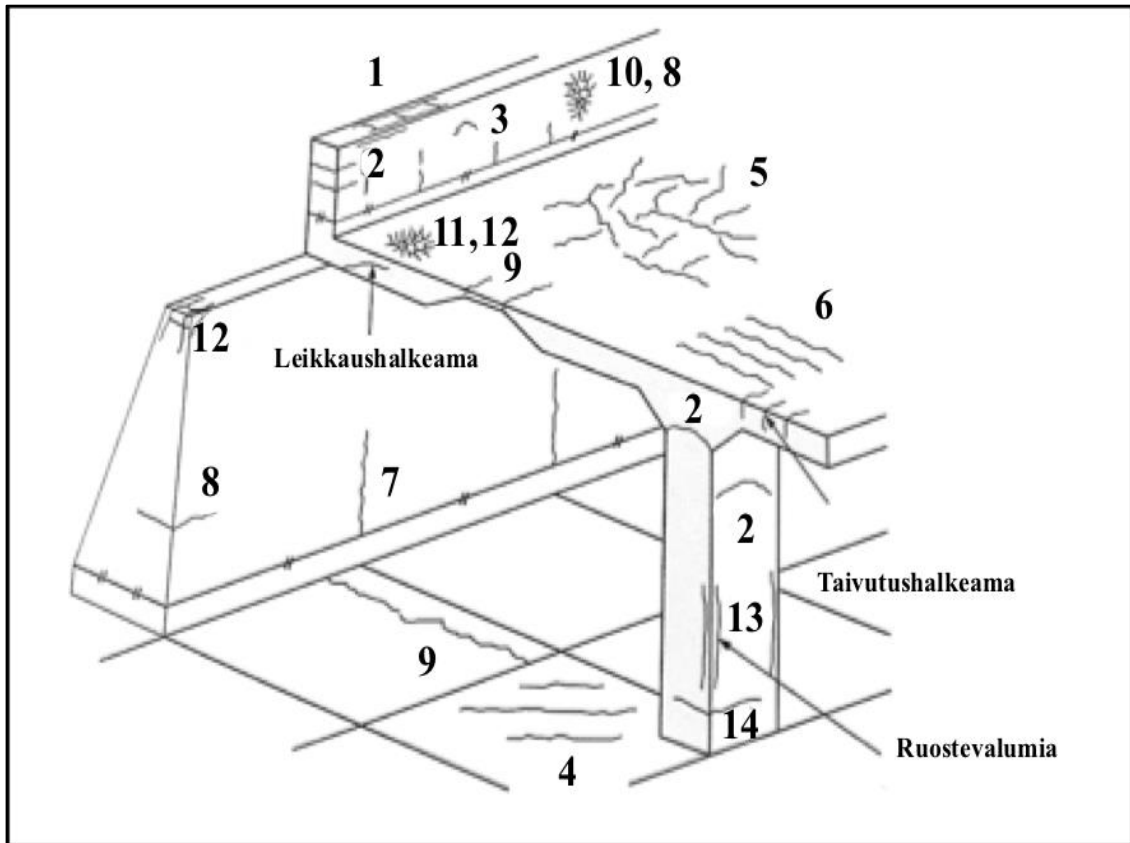
halkeilua. Halkeilun suuruuteen vaikuttavat kutistumatasojen suuruus ja vetolujuuden kehittymisnopeus. Kutistumatyyppinä on plastinen kutistuma, plastinen painuma, autogeeninen kutistuma, lämpömuodonmuutos ja kuivumiskutistuma. Ajallisesti (Taulukko 3) tyypit jaetaan varhaisvaiheen ja myöhäisvaiheen kutistumiin. (Anttila 2010)

Taulukko 3. Eri kutistumatyyppien ajallinen ajoittuminen betonin valmistamisen jälkeen. (Mukailtu lähteestä Anttila 2010)

Halkeilun syy	Halkeamisen syntymisajankohta (betonin ikä)			
	6 h tuntia	1 vrk vuorokausia	1 vk viikkoja	1 v
Plastinen kutistuma	■	■		
Plastinen painuma	■	■		
Autogeeninen kutistuma	■	■		
Lämpömuodonmuutos			■	■
Kuivumiskutistuminen			■	■

Plastinen kutistuma on suurinta ja se ajoittuu ensimmäisen vuorokauden ajalle, jolloin betoni on tuoretta. Sitä tapahtuu, kun betonin pinnasta haihtuva vesi ei enää korvautu betonipinnan alta nousevalla vedellä. Otollisin tilanne halkeilun muodostumiselle on, kun vettä haihtuu runsaasti ennen kuin betoni on ehtinyt sitoutua. Sitoutumisen jälkeen pinta sulkeutuu ja veden haihtuminen vähenee merkittävästi. Plastisen kutistuman muodostumiselle hyvät olosuhteet ovat tuuliset ja lämpimät säät. Notkistettu betoni, jonka vesisementtisuhde on matala, on altis plastiselle kutistumalle, koska betonin pintaan ei tällöin nouse vettä. (Anttila 2010)

Plastista painumaa (Kuva 16) voi esiintyä betonin ensimmäisen vuorokauden aikana. Se on ominaista korkeille rakenteille. Betonimassa painuu alaspäin ja vesi puolestaan nousee ylöspäin, josta aiheutuu esimerkiksi halkeilua terästen kohdalla. Plastista painumaa voidaan ehkäistä massavalinnalla sekä jälkitärytyksellä. Autogeeninen kutistuma tarkoittaa sellaista kutistumaa, joka on hydrataation aiheuttamaa. Se ajoittuu betonin kahden ensimmäisen vuorokauden ajalle. Muodostuvan sementtikiven tilavuusosuus pienenee verrattuna alkuperäisten aineiden tilavuuteen, jolloin betoni kuivuu sisäänpäin. Autogeenista kutistumaa voidaan ehkäistä sopivalla veden ja sementin määrällä. (Anttila 2010)



Kuva 16. Betonirakenteen halkeamatyyppejä: plastinen painuma (1, 2, 3), plastinen kutistuma (4, 5, 6), lämpöliike (7, 8), kuivumiskutistuma (9), pintahalkeilu (10, 11), pakkasrapautuminen (12), raudoitteiden korrosio (13) ja alkalikiviainesreaktio (14). (Mukailtu lähteestä Betoniyhdistys r.y. 2018)

Lämpömuodonmuutoskutistuma on ominaista paksuille massiivisille rakenteille, joissa betonin sitoutumisen aikana kehittyi runsaasti lämpöä. Rakenteen jäähtyminen tapahtuu epätasaisesti siten, että pinnat jäähtyvät ensimmäisenä. Vaarana on pintojen halkeilu. Yleisimmin lämpömuodonmuutoskutistumaa tapahtuu ajanjakson ensimmäinen vuorokausi ja ensimmäisen viikon välillä. (Anttila 2010)

Kuivumiskutistuma on yleisimmin tunnettu kutistumatyyppejä. Kaikki betonin valmistuksessa työstettävyyden parantamiseksi lisätty vesi ei yleensä reagoi sementin kanssa, vaan osa siitä haihtuu pois rakenteesta. Tämä aiheuttaa betonipintaan kuivumiskutistumaa. Halkeilun määrä ja voimakkuus ovat riippuvaisia olosuhteista. Ajallisesti kuivumiskutistumaa voi tapahtua ensimmäisestä vuorokaudesta aina vuoden ikään saakka. (Anttila 2010)

Hydrataatiossa muodostuvan sementtikiven tilavuus normaalibetonissa pienenee aina, joten kutistumista tapahtuu poikkeuksetta. Asianmukaisella jälkihoidolla voidaan kuitenkin estää kutistuman nopeuden liiallista kasvua. Hyvän jälkihoidon tarkoituksena onkin estää kutistuman muodostumista siihen asti, että vetolujuus on kehittynyt riittävän korkeaksi ottamaan vetojännitykset vastaan. Halkeilun rajoittamiseksi tai estämiseksi voidaan käyttää kuituja, kutistumaa kompensoivia lisäaineita ja ylliraudoitusta. (Anttila 2010)

Kylmissä olosuhteissa suoritettavissa betonointitöissä on vaarana tuoreen betonin jäätyminen (Kuva 17), joka johtaa jäälinsien muodostumiseen. Tämän seurauksena huokoisuus kasvaa, kiviaineen ja raudoituksen tartunnat heikkenevät sekä betoni saattaa halkeilla. Tuoreen betonin lisäksi myös sitoutuneen sementin jäätyminen aiheuttaa halkeilua. (Vuorinen 2012)



Kuva 17. Tuoreen betonin jääytymisestä johtuvaa neulasmaista rakennetta. Kuva vetolujuuskappaleen murtopinnassa. Lieriön halkaisija on 50 mm. (Kuva Antti Autere)

Betonin pinnan halkeilut suurentavat teräskorroosion riskiä, koska betonin läpäisevyys kasvaa. Halkeamia pitkin korroosiota aiheuttavat aineet pääsevät tunkeutumaan syvälle betoniin ja terästen pinnoille (Kuva 18) (Bakker 1988). Halkeaman haitallisuus riippuu pitkälle halkeaman leveydestä ja pituudesta sekä ulkoisesta rasituksesta kuten kosteus- ja kloridirasituksesta (Tuutti 1982).



Kuva 18. Voimakas pintaa vastaan kohtisuora halkeama nuoressa betonissa. Halkeama kulkee lähellä pintaa olevien terästen välistä. Vasemmalla olevassa kuvassa halkeama kuvattuna lattiavalun pinnasta. Oikeassa kuvassa sama lieriö halkaistuna, lattian pinta kuvassa ylhäällä. Näyte on porattu lattiavalusta. (Kuva Antti Autere)

## 5. KUNTOTUTKIMUS

Kuntotutkimus tarkoittaa rakennusosan tai rakennusosakokonaisuuden, kuten julkisivun, kunnan ja korjaustarpeen tutkimista. Kuntotutkimuksilla on tärkeä rooli korjaustoiminnan suunnitteluvaiheessa, koska ne toimivat pohjana korjausmenetelmien ja korjausten laajuuden arvioimisessa. Käytössä on useita tutkimustapoja erilaisten

vaurioiden selvittämiseksi. Näitä ovat esimerkiksi silmämääräinen tarkastelu, kenttämittaukset ja –tutkimukset, näytteenotto sekä laboratoriossa suoritettavat tutkimukset, joista käytetyimpiä ovat ohuthietutkimus ja vetolujuuskoeistus. Tarkoituksena on saada kattava kuva rakenteen mahdollisista vaurioista ja toimivuuden puutteellisuuksista sekä selvittää niiden tila, eteneminen, syyt ja vaikutukset. (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2013) Siltojen kuntotutkimuksista käytetään nimitystä sillan erikoistarkastus (Liikennevirasto 2010).

## **5.1 Kenttätutkimukset**

### *5.1.1 Raudoitteiden peitepaksuus*

Raudoitteiden peitepaksuuden tutkimisella selvitetään karbonatisoituneessa vyöhykkeessä, eli korroosion kannalta riskialttiissa vyöhykkeessä olevien terästen määrää. Tutkimuksesta saatavan tiedon avulla voidaan arvioida odotettavien korroosiovaurioiden määrää tulevaisuudessa. Peitepaksuuksien mittaamisessa voidaan käyttää peitepaksuusmittaria, joka on ainetta rikkomaton menetelmä. Sen toiminta pohjautuu sähkömagneettiseen induktioon, joten sillä havaitaan ainoastaan perinteiset, magneettiset raudoitteet. Ruostumattomat, alumiiniset ja harjakuparisiteet jäävät siis havaitsematta. Mittauksia suoritetaan yksittäisten elementtien edustavista osista. (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2013)

### *5.1.2 Vasarointi*

Päällepäin hyväkuntoiselta näyttävässä betonipinnassa saattaa olla pitkällekin rapautuneita osioita. Tällaisten osioiden löytäminen ja niiden määrän selvittäminen on kuntotutkimuksen kannalta tärkeää, koska se vaikuttaa korjaustavan valintaan. Sateen aiheuttaman kosteusrasituksen määrään vaikuttaa, sijaitseeko kohde rannikolla vai sisämaassa. Rannikolla vuotuiset sateet ovat määriltään suurempia sekä olosuhteet ovat tuulisemmat, jolloin viistosadetta on enemmän kuin sisämaassa. Myös ilmansuunta vaikuttaa kosteusrasituksen määrään. Suomessa sateet tulevat useimmiten kaakko-länsisuunnasta, jolloin niihin suuntiin olevat betonipinnat ovat enemmän rasitettuja. Tästä johtuen rakenteet on kartoitettava tarkasti voimakkaasti rapautuneiden osioiden löytämiseksi. Rakenteita vasaroidaan noin 1 kilogramman painoisella moskalla.



Rapautuneet osat huomataan matalasta koputusäänestä ja vasaran normaalia hitaammasta kimpoamisesta. Vasarointia suoritettaessa tehdään samalla myös rakenteiden silmämääräinen tarkistus ja havainnot pakkasrapautumisesta (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2013).

### *5.1.3 Karbonatisoitumissyvyys*

Karbonisoitumissyvyys pyritään määrittämään, jotta tiedetään, miten syvälle betonin neutraloituminen on edennyt. Tieto karbonisoitumisen etenemisestä kertoo, mihin syvyyteen betonin raudotteita suojaava ominaisuus päättyy. Karbonisoitumissyvyyden mittaamiseen (Kuva 19) käytetään pH-indikaattoria, jolla erotetaan karbonisoituneen (pH noin 8) ja karbonisoitumattoman (pH 13-14) vyöhykkeen raja. Yleensä pH-indikaattorina käytetään fenoliftaleiiniliuosta, joka värjää karbonisoitumattoman vyöhykkeen punaiseksi. Karbonisoituneessa vyöhykkeessä ei tapahdu värimuutosta. Mittaus tehdään rakenteesta poratun lieriön pinnalta heti poraamisen ja lieriön puhdistamisen jälkeen tai vaihtoehtoisesti lieriö halkaistaan ja mittaus tehdään halkaistulle pinnalle myöhemmin. Karbonisoitumissyvyys voidaan määrittää myös betoniin poratun reiän seinämiltä. (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2013)

Karbonisoituminen etenee betonissa melko epätasaisesti ja syvyys vaihtelee jo yhden näytteen sisällä. Tästä johtuen mittauksessa arvioidaan keskimääräinen karbonisoitumissyvyys. Jos näyte on porattu rakenteen tai rakenneosan läpi, suoritetaan mittaus näytteen molemmille päille. (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2013)



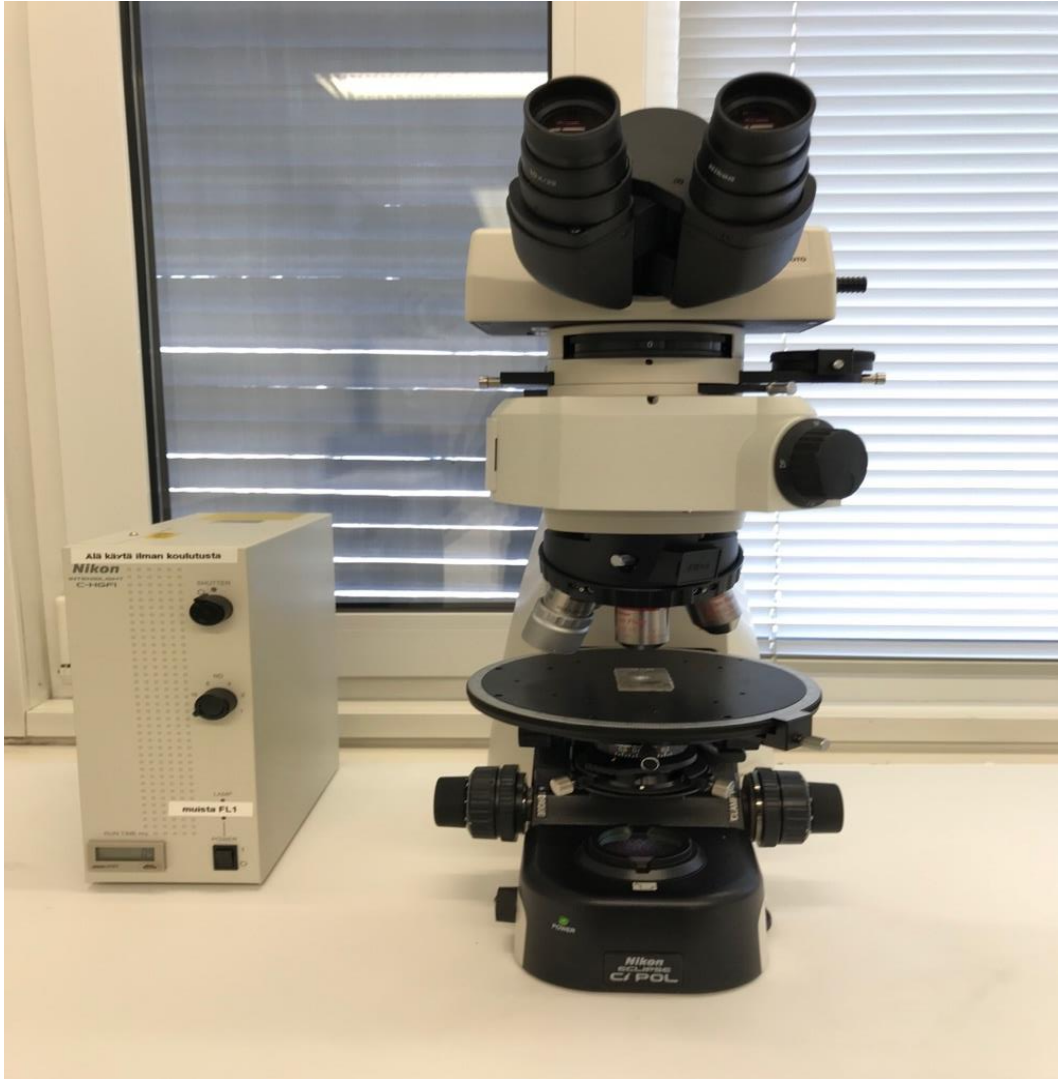
Kuva 19. Karbonatisoitumissyvyyden määrittäminen halkaistusta poralieriöstä fenoliftaleiiniliuoksella. Karbonatisoituneessa vyöhykkeessä ei tapahdu värimuutoksia, kun taas karbonatisoitumaton vyöhyke värjäytyy punaiseksi. Kappaleessa pinnansuuntainen säröily on pakkasrapautuman aiheuttamaa. Näytteen leveys on 45 mm. (Kuva Antti Autere)

## 5.2 Laboratoriotutkimukset

### 5.2.1 Ohuthietutkimus

Betonin rapautumisen tutkiminen suoritetaan mikrorakennetutkimuksella. Rapautumistilanne tutkitaan polarisaatiomikroskoopilla ohuthieestä (Kuva 20), koska se ei välttämättä ole muilla menetelmillä todettavissa. Pintahienäytteestä ja etenkin ohuthienäytteestä saadaan yksityiskohtaista informaatiota betonin laadusta ja sen hetkisestä kunnosta. Ohuthietutkimuksessa selvitetään esimerkiksi seuraavia asioita: betonin pakkaskestävyys (suojahuokosten olemassaolo), säröt, niiden suuntautuneisuus, aiheuttaja sekä rapautumisaste, huokostäytteet ja mahdollinen

alkalikiviainesreaktio. Muita ohuthietutkimuksella saavutettavia tietoja ovat betonin yleinen laatu, karbonatisoitumissyvyys, eri kerrosten tartunnat sekä mahdollisen pinnoitteen tartunta ja sen asbestipitoisuuden selvittäminen. (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2013)



Kuva 20. Betonin mikrorakennetutkimuksissa käytettävä polarisaatiomikroskooppi. (Kuva Antti Autere)

Hienäytettä varten betonirakenteesta porataan timanttiporalla lieriönäyte. Lieriö halkaistaan timanttisahalla (Kuva 21) ja ohuthienäyte valmistetaan tapauksesta riippuen joko kohtisuoraan ulko-/sisäpintaa tai ylä-/alapintaa vastaan. Tällä tavoin saadaan parhaiten selvitettyä mahdollisen pakkasrapautumisen esiintyminen, joka esiintyy pääosin rakenteen pinnansuuntaisesti lähellä kosteudelle altistuvaa pintaa. (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2013)



Kuva 21. Betonilieriö halkaistaan pituussuunnassa timanttisahalla. Lieriön halkaisun jälkeen toinen lieriönpuolikas pestään ja kuivataan pinta. Kuivuneelle pinnalle suihkutetaan fenoliftaleiini karbonatisoitumissyvyyden määrittämiseksi. (Kuva Antti Autere)

Ohuthietutkimuksen näytteenottokohdat on suositeltavaa suunnitella seuraavien ohjeiden mukaisesti. Jos muilla tutkimusmenetelmillä ei ole saatu tietoa rapautumisesta, porataan näytteet sellaisesta kohdasta, josta rapautumisen voidaan olettaa alkavan. Hyviä kohtia ovat esimerkiksi sellaiset, jotka altistuvat voimakkaalle pakkasrasitukselle. Mikäli halutaan selvittää rapautumisen olemassaoloa ja syytä, otetaan näytteet kohdasta, jossa havaitaan mahdollisia rapautumisen merkkejä. Jos taas havaitaan selkeää rapautumaa, otetaan näytteet läheltä rapautumakohtaa ehjän näköiseltä alueelta, jolloin saadaan tietoa rapautumisen paikallisuudesta. (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2013)

Mikäli rapautuminen on selkeää ja laaja-alaista, otetaan näytteet kevyemmin rapautuneesta kohdasta, jolloin voidaan kartoittaa rapautuman laajuutta. Suoraan

rapautuneesta betonista näytteet otetaan siinä tapauksessa, kun halutaan erityisesti selvittää rapautumisen syy. (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2013)

Ohuthietutkimuksia varten tarvittavien näytteiden määrää on vaikea määrittää yleisesti, koska kohteet ovat vaihtelevia. Eroja tarvittavien ohuthietutkimusten kappalemäärään aiheuttavat silmämääräinen rapautumistilanne, pakkasrasituksen määrä, tutkimuksen haluttu tarkkuus, rapautumisen kriittisyys, eri rakennetyyppien määrä ja näytteen kattavuus. Kohteissa, joissa rapautumaa ei ole päällepäin eikä vasaroimalla havaittavissa, kannattaa tehdä ainakin kolme ohuthietä kovimmalle pakkasrasitukselle altistuvista kohdista, jotta tiedetään varmuudella, esiintyykö rapautumista (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2013). Siltojen erikoistarkastuksissa ohuthietien määrään vaikuttaa sillan pinta-ala. Vähimmäiskappalemäärä on ilmoitettu erikoistarkastuksen laatuvaatimuksissa (Liikennevirasto 2010).

### *5.2.2 Vetolujuuskoe*

Rapautuminen aiheuttaa betoniin mikrohalkeilua, joka alentaa betonin lujuutta. Vetolujuuteen mikrohalkeilu vaikuttaa huomattavasti enemmän kuin puristuslujuuteen. Tästä johtuen vetolujuuskoetta voidaan käyttää apuna arvioitaessa betonin rapautuneisuutta. Samalla voidaan arvioida betonin laatua sekä korjattavuutta, kuten esimerkiksi laastien tartuntaa. Vetolujuuskoetta käytetään myös pintatarvikkeiden tartuntalujuuden määrittämiseen. (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2013)

Vetolujuuskoetta varten betonista porataan lieriönäyte, jonka halkaisija on usein 50 tai 75 millimetriä. Koeistus (kuva 22) tehdään yleensä laboratoriossa, mutta sen voi suorittaa myös tutkimuskohteessa. Mikäli lieriönäyte porataan läpi rakenteesta, saadaan tietää vetolujuus koko rakenteen paksuudelta, eikä vain tiettyyn syvyyteen asti. (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2013)



Kuva 22. Vetolujuuskoeistus voidaan suorittaa kuvanmukaisella laitteella. (Kuva Antti Autere)

Vetolujuuskokeen tuloksia voidaan käyttää apuna rapautuneisuuden arvioinnissa (Taulukko 4). Mitä heikompi tulos kokeessa saadaan, sitä rapautuneempaa betoni yleensä on. Tuloksia arvioitaessa tulee kuitenkin huomata, että alhainen tulos ei aina kerro suoraan rapautumisasteesta. Tällaisia ovat esimerkiksi tilanteet, joissa lieriö on murtunut esimerkiksi teräksen tai suuren kiviainekappaleen kohdalta. Alhainen tulos vetolujuuskokeessa voi johtua myös kiviaineen laadusta ja koosta, betonin alhaisesta lujustasosta tai betoniin vaikuttavista pakkovoimista. Vetolujuuskokeen tukena on hyvä käyttää ohuthietutkimusta, jotta alhaisen tuloksen syy voidaan selvittää. Yhden vetolujuuskokeen pohjalta ei voida tehdä merkittäviä päätelmiä, vaan kokeita tulee suorittaa useampia luotettavan tutkimuksen varmistamiseksi. (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2013)

Taulukko 4. Vetolujuuden käyttö apuna rapautumistilanteen arvioinnissa. (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2013)

Vetolujuus	Rapautumistilanne
0 MN/m <sup>2</sup> – noin 0,5 MN/m <sup>2</sup>	Rapautuminen pitkälle edennyttä
Noin 0,5 MN/m <sup>2</sup> – 1,0 MN/m <sup>2</sup>	Rapautuminen jonkinasteista
Yli 1,5 MN/m <sup>2</sup>	Rapautuminen ei todennäköistä

Lieriönäytteen murtotapaa voidaan käyttää rapautumisen arvioinnissa. Mikäli murtuminen on tapahtunut alhaisella vetolujuustuloksella kiviaineen pintoja myötäillen, on betonissa todennäköisesti tapahtunut rapautumista. Rapautumattoman betonin murtopinta on yleensä melko suora ja kiviainetta leikkaava. Tulee kuitenkin huomata, että kiviaineen ollessa pyöreää ja suurirakeista, on kiviainetta myötäilevä murtuminen yleistä. Myötäilevä murtuminen voi myös kertoa vedenerottumisesta kiviaineen pinnoilla. Vetolujuuskokeessa murtuneen lieriön kappaleet voidaan liimata takaisin yhteen ja suorittaa koe uudelleen. Uusintaveto suoritetaan, mikäli tulos oli heikko tai halutaan varmistua siitä, että tulokseen ei vaikuttanut paikallinen virhe tai halkeama, joka ei liity rapautumiseen. (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2013)

### 5.2.3 Kloridipitoisuus

Kloridit voivat aiheuttaa alkalisessakin betonissa olevien terästen korroosiota jo pieninäkin pitoisuuksina. Kriittisenä kloridipitoisuutena terästen korroosion kannalta pidetään 0,03 – 0,07 paino-% betonin painosta. Käytännössä raja-arvo vaihtelee kuitenkin betonin tiivyydestä, alkalisuudesta ja sementtimäärästä riippuen. Karbonatisoituminen kiihdyttää kloridikorroosiota, koska se vapauttaa klorideja. (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2013)

Kloridikorroosion esiintyminen johtaa usein raskaisiin korjauksiin. Tästä syystä betonin kloridipitoisuutta on tärkeää tutkia ainakin pistokokeina. Sitä on perusteltua tutkia myös, koska kloridit nopeuttavat huomattavasti karbonatisoitumisesta johtuvaa teräskorroosiota. Kloridikorroosiota on yleensä mahdotonta tunnistaa, mikäli rakenneavausta ei suoriteta. (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2013)

Kloridipitoisuus määritetään jauhenäytteestä titraamalla. Jauhenäytteen suurin raekoko on alle 0,1 mm ja sementtiä pitää olla vähintään 2 grammaa. Näyte voidaan kerätä joko poravasarella poratusta reiästä syntyneestä jauheesta tai murskaamalla betonikappale hienoksi jauheeksi (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2013). Klorideja voi päätyä betoniin esimerkiksi tiesuolauksesta ja merivedestä, tai niitä on voitu käyttää betonin valmistuksessa (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2013, Betoniyhdistys r.y. 2018). Tästä syystä esimerkiksi siltakohteissa ja meren rannalla olevissa kohteissa selvitetään, ovatko kloridit peräisin valmistuksesta vai ulkoisesta rasituksesta. Mikäli kloridit ovat peräisin rakenteen valmistuksesta, on pitoisuus sama syvyydestä riippumatta. Jos kloridipitoisuudet johtuvat ulkoisesta rasituksesta, on pitoisuus korkeampi pinnan tuntumassa kuin syvemmillä betonissa (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2013).

## **6. TUTKIMUKSET**

Tässä työssä on tutkittu betonin ohuthietutkimusten ja vetolujuuskoeistuksen tulosten vertailukelpoisuutta. Aineistona on käytetty Labroc Oy:n laboratoriotutkimuksien tuloksia. Tämän työn aineistoksi valittiin sellaisia kohteita, joissa samoista rakenteista on tehty sekä ohuthietutkimuksia että vetolujuuskokeita. Aineiston valinnassa huomioitiin, että mukaan saadaan erilaisia tutkimuskohteita ja rakenteita sekä vauriomekanismeja.

### **6.1 Tutkimusmenetelmät**

#### *6.1.1 Ohuthieet ja niiden valmistaminen*

Betonien ominaisuuksien tutkimiseen käytettiin ohuthieitä. Ohuthienäyte valmistetaan betonilieriöstä laboratoriossa. Poralieriö halkaistaan timanttisahalla pituussuunnassa, jonka jälkeen valitaan puoli, josta valmistetaan ohuthie. Toisesta puolikkaasta tutkitaan karbonatisoitumissyvyys suihkuttamalla sen pintaan fenoliftaleiiniliuosta. Lieriön puolikkaaseen, josta valmistetaan ohuthie, piirretään preparaattilasiasa apuna käyttäen ohuthieen reunat. Tämän jälkeen ohuthieaihio sahataan hienommalla sahalla edellä piirrettyjä viivoja pitkin irti lieriön puolikkaasta. Irti sahatun ohuthieaihion pinta kiillotetaan tahkohiomakoneella tasaiseksi ja kiiltäväksi. Aihion annetaan kuivua 37 °C uunissa noin vuorokauden. Aihion kuivuttua sen pintaan liimataan preparaattilasi



epoksiliimalla. Liiman annetaan kovettua noin 24 tuntia. Liiman kovettuttua lasi sahataan irti aihioista siten, että lasin päälle jää noin 3 mm paksuinen betonisuikale. Näytettä ohennetaan kuppilaikalla sellaiseen paksuuteen, että näyte on läpikuultava. Viimeinen ohennus suoritetaan käsin karkeudeltaan 220 mesh vesihionta-alustalla. Hionnan aikana ohuthieen paksuutta tarkkaillaan mikroskoopilla (kuva 23). Ohuthieen tavoitepaksuus on 0,02 mm. Oikea paksuus on saavutettu, kun ohuthieessä olevat kvartsirakeet ovat mikroskoopilla polarisoivalla valolla tarkasteltaessa väriltään hamaita.



Kuva 23. Ohuthienäyte ohennetaan käsin hiomalla 0,02 mm paksuiseksi. Ohennusvaiheessa käytetään karkeudeltaan 220 mesh vesihionta-alustaa ja hieen paksuutta tarkkaillaan mikroskoopilla. (Kuva Antti Autere)

### *6.1.2 Ohuthieanalyysin menetelmäkuvaus*

Ohuthieen tutkimista ohjaa standardi ASTM C856-17 Standardikäytäntö kovettuneen betonin petrografian tutkimiseksi (Standard Practice for Petrographic Examination of Hardened Concrete). Eri laboratorioilla on toisistaan eroavia raportteja. Tässä työssä

käytetään ainoastaan Labroc Oy:n raportteja ja arviointiasteikkoja.

Ohuthieanalyysi on petrografinen analyysi, jossa kuvataan kovettuneen betonin laatuun ja kuntoon vaikuttavia tekijöitä näytekappaleesta valmistetusta ohuthieestä, jonka koko on 48 mm x 25 mm tai 76 mm x 25 mm. Ohuthieen lisäksi tutkitaan ja raportoidaan myös koekappaleet, joista ohuthieet on valmistettu. Betonikoekappaleet ja niistä valmistetut ohuthieet tutkitaan stereo- ja polarisaatiomikroskoopilla tilaajan antamien tietojen pohjalta. Koekappaleet ja ohuthieet valokuvataan tarvittaessa ja valokuvat liitetään raporttiin. Standardia noudattaen ohuthieanalyysillä voidaan tarvittaessa tutkia myös testikoekappaleita, betonituotteita sekä laboratorioekappaleita.

Labroc Oy:ssa ohuthieanalyysi vastaa suurelta osin standardia ASTM C856-17. Tutkimukseen kuuluu koekappaleiden silmämääräinen ja stereomikroskooppinen tutkimus, ohuthieen tutkimus polarisaatiomikroskoopilla sekä sideaineen ominaispiirteiden havainnointi.

Analyysiraportti sisältää tiedot näytteen taustatiedoista, sijainnista rakenneosassa, näytekuvauksen, arvion betoniin käytetyistä materiaaleista, tiivistymisestä, sideaineen laadusta, huokosrakenteesta, säröilystä, rapautumisesta (Taulukko 5) ja sekundäärisistä kiteytymistä sekä yleisestä kunnosta. Tämän lisäksi raportissa on yhteenveto (Kuva 24), jossa arvioidaan kemiallisia ja fysikaalisia tekijöitä, jotka ovat johtaneet betonin rapautumiseen ja vaikuttaneet kestävyyyteen kyseisissä olosuhteissa. Ohuthieanalyysin tutkimusraportti lähetetään sähköisesti tilaajalle yhdessä muiden mahdollisten tutkimusraporttien kanssa. Mahdollisia muita tutkimuksia ovat esimerkiksi veto- ja puristuslujuudet, kloridianalyysit sekä pinnoitteiden asbestianalyysit. (Labroc Oy, ohuthietutkimuksen menetelmäkuvaus ja työohje)

Taulukko 5. Labroc Oy:ssa käytössä oleva 5-portainen rapautuneisuuden arviointiasteikko. Rapautuneisuuden arvo ohuthieen perusteella määräytyy taulukossa esitettyjen tekijöiden perusteella. (Antti Autere)

Rapautuneisuuden arvo	Sideaine	Kiteymät	Teräs-korroosio	Säröily
<b>0 – Ei rapautumaa</b>	Lähes muuttumatonta/vähäistä muuttumista	Ei/ vähäisiä tätekiteymiä	Ei juurikaan havaittavaa korroosiota	-
<b>1 - Vähäistä</b>	Osittain liuennutta, karbonitsoituminen voimakasta, osin reikäistä	Osa pienistä huokosista umpeutunut	Vähäistä	Vähäistä lyhyttä/ katkonaista pakkassäröilyä, paikoin AKR:n geeliä huokosissa/säröissä, voimakkaampaa kutistumasäröilyä esim. pesubetonissa
<b>2 - Orastavaa</b>	Selkeämmin muuttunutta/ liuennutta, näytteen pinnassa mahdollisesti kemiallista muuttumista/irtoilua	Useat pienet huokokset kiteytyneet umpeen	Selkeää	Useita pakkassäröjä läpi ohuthieen, runsaammin AKR geeliä huokosissa/säröissä
<b>3 - Kohtalaista</b>	Läpikotaisin muuttunutta tai liuennutta	Runsaammin täyteen kiteytyneitä huokosia, säröissä kiteymiä	Voimakasta	Ohuthieen läpi useita pakkassäröjä, joissa tätekiteymiä, voimakkaan AKR:n aiheuttamaa säröilyä
<b>4 - Voimakasta</b>	Voimakkaasti muuttunutta, voi olla kauttaaltaan liuennutta	Runsaasti	Voimakasta	Pakkasrapautumisen tai AKR:n aiheuttamia voimakkaita säröjä, näyte mahdollisesti hajonnut näytteenotossa

<b>YHTEENVETO/ TULOSTEN ARVIOINTI:</b>					
Taulukossa on arvioitu näytteiden kuntoa asteikolla: HYVÄ, TYYDYTTÄVÄ, VÄLTTÄVÄ ja HEIKKO. Karbonatisoituminen on mitattu ohuthieestä ja/tai fenoliftaleiiniliuoksella lieriön halkaistulta pinnalta. Rapautuneisuutta on kuvattu asteikolla 0-4: 0 - ei rapautumaa, 1 - vähäistä, 2 - orastavaa, 3 - kohtalaista, 4 - voimakasta.					
Näyte:	Rakenneos/ohuthiepinta:	Kunto:	Karbonatisoituminen min-max/ka.(mm):	Huokostus/huokostäytteet	Rapautuneisuus:
1	parvekelaatta/ alapinta	välttävä	kantava laatta yläpinta <1-5/3 alapinta 7-12/10	ei/ettringiitti	3
7	parvekelaatta/ alapinta	tydyttävä	yläpinta 6-10/8 alapinta 22-29/25	ei/ei	0
9	parvekelaatta/ alapinta	tydyttävä	kantava laatta yläpinta 3-9/5 alapinta 55-58/57	ei/ei	0
<ul style="list-style-type: none"> <li>- näytteen 1 betonissa havaittiin runsaasti pakkasrapautuman aiheuttamaa pinnansuuntaista säröilyä läpi kantavan laatan, alapinnasta 0-48 mm syvyyteen betonin kunto on välttävä</li> <li>- näytteiden 7 ja 9 betonit ovat laadultaan ja tiivistyneisyydeltään tyydyttäviä</li> <li>- betonien sideaine on hieman harvaa</li> <li>- karbonatisoituminen on edennyt näytteiden yläpinnoissa jonkin verran, alapinnoissa karbonatisoituminen on voimakkaampaa</li> <li>- näytteissä 7 ja 9 olevat teräkset sijaitsevat karbonatisoituneella vyöhykkeellä, teräkset ovat ruostuneet, näytteen 1 teräkset sijaitsevat karbonatisoitumattomalla vyöhykkeellä, eivät ole ruosteessa</li> <li>- betonit eivät ole huokostettuja, eivätkä ne huokosrakenteensa perusteella ole pakkasenkestäviä kosteusrasituksessa</li> <li>- näytteessä 1 havaittiin paikoin ettringiitin täyttämiä huokosia, joka viittaa pitkäaikaiseen kosteusrasitukseen, muissa näytteissä ei havaittu merkittäviä kiteytymiä</li> </ul>					

Kuva 24. Labroc Oy:n ohuthieraportin yhteenveto-osa.

### 6.1.3 Vetolujuuskappaleen valmistaminen ja menetelmäkuvaus

Vetolujuuskappale valmistetaan tutkimuskohteesta poratusta betonilieriöstä. Betonilieriön molemmat päät tasoitetaan hiomalla, jonka jälkeen kappale kuivataan 37 °C uunissa noin vuorokauden ajan. Tämän jälkeen kappaleen molempiin päihin liimataan teräskiekot. Liiman annetaan kovettua noin vuorokausi. Vetokappale kiinnitetään pultilla vetolujuusalustaan ja vetolaitteeseen, jonka jälkeen sitä vedetään vetolaitteella (Proceq DY-225) murtumapisteeseen asti. Vetolujuuden arvo (MN/m<sup>2</sup>) kirjataan ylös ja mitataan murtokohdan etäisyys halutusta pinnasta. Kappaleessa havaitut mahdolliset poikkeamat kirjataan vetolujuusraporttiin (Kuva 25). Poikkeamia ovat

esimerkiksi murtopinnan teräkset, suuret kiviainekappaleet ja havainnot alkalikiviainesreaktiosta.

TULOKSET: Näytteenottaja:					
Näyte	Materiaali / tila tai rakennusosa	Lieriön halkaisija	Tulos MN/m <sup>2</sup>	Murtokohta ja -tapa	Poikkeama
2	Parvekelaatta, talo 1	55 mm	0,7	10-27 mm yläpinnasta, myötäilee	-
2 uusinta	Parvekelaatta, talo 1	55 mm	1,0	4-16 mm yläpinnasta, pääosin myötäilee	-
3	Parvekelaatta, talo 2	55 mm	0,6	69-88 mm kantavan laatan yläpinnasta, pääosin myötäilee	-
3 uusinta	Parvekelaatta, talo 2	55 mm	0,7	102-112 mm kantavan laatan yläpinnasta, pääosin myötäilee	-
4	Parvekelaatta, talo 2	55 mm	2,1	91-100 mm alapinnasta, pääosin myötäilee	-
5	Parvekelaatta, talo 3	55 mm	1,6	51-85 mm alapinnasta, pääosin myötäilee	murtokohdassa kivi n. 25 % näytteen halkaisijasta
6	Parvekelaatta, talo 3	55 mm	2,5	133-142 mm alapinnasta, pääosin myötäilee	murtokohdassa teräs Ø 6 mm
8	Parvekelaatta, talo 4	55 mm	2,1	32-48 mm alapinnasta, pääosin myötäilee	-

Kuva 25. Labroc Oy:ssä käytössä oleva vetokoeraportti.

## 7. TULOKSET

### 7.1 Kohdetutkimus 1, maantiesilta

Sillan erikoistarkastuksessa ohuthie- ja vetolujuusnäytteet ovat porattu vierekkäin läheltä toisiaan, joka mahdollistaa saatujen tulosten vertailun. Tulosten voidaan olettaa korreloivan keskenään.

Ohuthietutkimuksissa näytteissä 3 ja 5 havaittiin kohtalaisen runsaasti rapautumisesta johtuvaa säröilyä. Säröilyn takia em. betonien kunto on arvioitu olevan välttävä ja heikko (rapautuneisuus 2 ja 3). Betonien 1, 2 ja 4 kunto on hyvä ja rapautumisen aiheuttavaa

säröilyä ei havaittu. Laadultaan betonit ovat suhteellisen hyviä ja pääosin hyvin tiivistyneitä pois lukien betonit 3 ja 5, joissa voimakas säröily heikentää tiiveyttä. Vetolujuuskokeessa näytteiden 2 ja 4 tulokset olivat hyvät. Näytteille 1, 3 ja 5 suoritettiin uusintaveto, koska ensimmäisen vetolujuuskokeen tulos oli alle 1,5 MN/m<sup>2</sup>. Näytteen 1 ensimmäisen vedon tulos oli 1,1 MN/m<sup>2</sup>, ja murtuminen tapahtui yläpinnasta 6-7 mm etäisyydellä lakkapinnan ja betonin tartunnan kohdalta. Uusintavedossa tulokseksi saatiin 2,9 MN/m<sup>2</sup>. Näytteen 3 ensimmäisen vedon tulos oli 0,4 MN/m<sup>2</sup> murtumisen tapahtuessa 16-26 mm etäisyydellä yläpinnasta. Murtopinnassa havaittiin viitteitä alkalikiviainesreaktiosta. Uusintavedon tulos oli 0,9 MN/m<sup>2</sup> murtumisen tapahduttua 37-45 mm etäisyydellä yläpinnasta. Murtopinnassa oli viitteitä alkalikiviainesreaktiosta sekä Ø 12 mm teräs. Näytteen 5 ensimmäisen vedon tulos oli 0,9 MN/m<sup>2</sup>. Murtuminen tapahtui yläpinnasta 26-37 mm etäisyydellä kiviainetta pääosin myötäillen. Molempien vetojen murtopinnoissa havaittiin viitteitä alkalikiviainesreaktiosta. Uusintavedon tulos oli 1,8 MN/m<sup>2</sup>, jolloin murtuminen tapahtui 17-23 mm etäisyydellä yläpinnasta pääosin leikaten kiviainesta.

Taulukko 6. Kohdetutkimus 1. Maantiesillan ohuthietutkimuksen ja vetolujuuskoeistusten tulokset.

Ohuthienäyte	Rakenneosa/ pinta	Kunto	Rapautuneisuus (asteikko 0-4)
1	Kansilaatta/ Yläpinta	Hyvä	0
2	Kansilaatta/ Yläpinta	Hyvä	0
3	Kansilaatta/ Yläpinta	Välttävä	2
4	Kansilaatta/ Yläpinta	Hyvä	0
5	Kansilaatta/ Yläpinta	Heikko	3
Vetolujuusnäyte	Rakenneosa	Tulos (MN/m <sup>2</sup> )	Murtokohta ja-tapa
1	Kansilaatta/ Yläpinta	1,1	6-7 mm yläpinnasta, murtokohta lakkapinnan ja betonin tartunnasta
1 uusinta	Kansilaatta/ Yläpinta	2,9	5-14 mm betonin yläpinnasta, pääosin leikkaa
2	Kansilaatta/	2,5	7-21 mm yläpinnasta, pääosin myötäilee

	Yläpinta		
3	Kansilaatta/ Yläpinta	0,4	16-26 mm yläpinnasta, pääosin leikkaa, viitteitä AKR
3 uusinta	Kansilaatta/ Yläpinta	0,9	37-45 mm yläpinnasta, pääosin leikkaa, viitteitä AKR, murtokohdassa Ø12 mm teräs
4	Kansilaatta/ Yläpinta	2,8	24-51 mm yläpinnasta, pääosin leikkaa
5	Kansilaatta/ Yläpinta	0,9	26-37 mm yläpinnasta, pääosin myötäilee, viitteitä AKR
5 uusinta	Kansilaatta/ Yläpinta	1,8	17-23 mm yläpinnasta, pääosin leikkaa, viitteitä AKR

## 7.2 Kohdetutkimus 2, vesistön ylittävä maantiesilta

Sillan kuntotutkimuksessa näytteenotto suoritettiin siten, että ohuthie- ja vetolujuusnäytteet porattiin vierekkäin. Tämä mahdollistaa saatujen tulosten vertailun, koska tulosten voidaan olettaa korreloivan keskenään.

Ohuthietutkimuksessa betonien kunto vaihtelee hyvästä välttävään (rapautuneisuus 0-3) ja ne ovat pääosin tasalaatuisia sekä hyvin tiivistyneitä. Osassa betoneista on havaittavissa heikohkoa mikrosäröilyä, joka on pakkasrapautumisen ja alkalirunkoainesreaktion aiheuttamaa. Näytteet 1 ja 8, jotka ovat sillan kannen yläpinnasta, ovat voimakkaimmin vaurioituneita. Miltei kaikissa betoneissa havaittiin huokosissa ja mikrosäröissä kosteusrasitukseen viittaavaa ettringiittikiteytymää sekä yksittäisesti alkalirunkoainesreaktiosta johtuvaa alkali-piigeeliä.

Näytteiden vetolujuuskokeiden tulokset vaihtelevat välillä 0,5 – 3,8 MN/m<sup>2</sup>. Näyte 1 vedettiin kaksi kertaa tuloksen ollessa molemmilla kerroilla 0,5 MN/m<sup>2</sup>. Ensin murtuminen tapahtui 8-28 mm ja toisella vedolla 1-10 mm etäisyydellä kannen yläpinnasta. Näyte 8 vedettiin kaksi kertaa ensimmäisen vedon tuloksen ollessa 0,6 MN/m<sup>2</sup> ja toisen vedon tuloksen ollessa 1,6 MN/m<sup>2</sup>. Murtokohdat olivat 23-35 mm ja 26-36 mm kannen yläpinnasta. Myös näyte 13 jouduttiin vetämään uudestaan ensimmäisen tuloksen ollessa 1,4 MN/m<sup>2</sup> ja toisen 1,7 MN/m<sup>2</sup>. Ensimmäisessä vedossa näytteen 13 murtokohta oli 11-41 mm ja toisella kerralla 25-60 mm sivupinnasta. Kaikkien kolmen näytteen kohdalla ensimmäisen ja toisen vedon murtuminen sijoittuu molemmilla

vetokerroilla samalle syvyydelle. Tämän perusteella heikoin vyöhyke sijaitsee kyseisillä syvyyksillä.

Taulukko 7. Kohdetutkimus 2. Vesistön ylittävän maantiesillan ohuthietutkimuksen ja vetolujuuskoeistusten tulokset.

Ohuthienäyte	Rakenneosa/ pinta	Kunto	Rapautuneisuus (asteikko 0-4)
1	Kansi/ Yläpinta	Yläpinta 0-48 mm välttävä	3
2	Kansi/ Yläpinta	Hyvä	0
3	Kansi/ Yläpinta	Hyvä	1
4	Kansi/ Yläpinta	Yläpinta 0-30 mm tyydyttävä, muuten hyvä	1
5	Kansi/ Yläpinta	Hyvä	0
6	Kansi/ Yläpinta	Hyvä	0
7	Kansi/ Yläpinta	Hyvä	1
8	Kansi/ Yläpinta	Välttävä (katkeamia)	3
9	Kansi/ Alapinta	Hyvä	0
10	Kansi/ Alapinta	Tyydyttävä	2
11	Kansi/ Alapinta	Tyydyttävä	1
12	Kansi/ Sivupinta	Hyvä	0
13	Kansi/ Sivupinta	Tyydyttävä	1
14	Reunapalkki/ Ulkopinta	Tyydyttävä	1
15	Reunapalkki/ Ulkopinta	Hyvä	0
Vetolujuusnäyte	Rakenneosa	Tulos ( MN/m <sup>2</sup> )	Murtokohta ja-tapa
1	Kansilaatta/ Yläpinta	0,5	8-28 mm yläpinnasta, pääosin myötäilee, viitteitä AKR
1 uusinta	Kansilaatta/ Yläpinta	0,5	1-10 mm, pääosin myötäilee, viitteitä AKR
2	Kansilaatta/ Yläpinta	2,5	27-39 mm yläpinnasta, pääosin myötäilee
3	Kansilaatta/ Yläpinta	1,6	29-36 mm yläpinnasta, myötäilee
4	Kansilaatta/ Yläpinta	1,5	63-76 mm yläpinnasta, pääosin myötäilee



5	Kansilaatta/ Yläpinta	2,2	36-47 mm yläpinnasta, pääosin myötäilee
6	Kansilaatta/ Yläpinta	2,3	50-61 mm yläpinnasta, pääosin myötäilee
7	Kansilaatta/ Yläpinta	2,1	8-23 yläpinnasta, pääosin myötäilee
8	Kansilaatta/ Yläpinta	0,6	23-35 mm yläpinnasta, pääosin myötäilee
8 uusinta	Kansilaatta/ Yläpinta	1,6	26-36 yläpinnasta, pääosin myötäilee
9	Kansilaatta/ Alapinta	2,4	35-52 mm alapinnasta, pääosin myötäilee
10	Kansilaatta/ Alapinta	2,2	35-42 mm alapinnasta, pääosin myötäilee
11	Kansilaatta/ Alapinta	1,8	61-87 mm alapinnasta, pääosin myötäilee, murtokohdassa kivi 50 %
12	Kansilaatta/ Sivupinta	2,9	53-78 mm sivupinnasta, pääosin myötäilee
13	Kansilaatta/ Sivupinta	1,4	11-41 mm sivupinnasta, pääosin myötäilee
13 uusinta	Kansilaatta/ Sivupinta	1,7	25-60 mm sivupinnasta, pääosin myötäilee
14	Reunapalkki	1,9	60-81 mm ulkopinnasta, pääosin myötäilee
15	Reunapalkki	3,8	69-84 mm ulkopinnasta, pääosin myötäilee
16	Reunapalkki	3,6	53-64 mm ulkopinnasta, pääosin leikkaa

### 7.3 Kohdetutkimus 3, asuinkerrostalo

Kuntotutkimuksissa ohuthie- ja vetolujuusnäytteitä ei porattu pareittain. Tulokset eivät ole täysin vertailukelpoisia keskenään, mutta ne antavat kokonaiskuvan kohteen tilanteesta. Tämä kohde edustaa tyypillistä kuntotutkimuksissa käytettyä näytteenottotapaa.

Ohuthietutkimusta varten näytteitä on porattu kahdeksan kappaletta, joista yksi sokkelista ja seitsemän julkisivusta. Sokkelinäytteen (näyte 1) pinnassa on kahdesta osakerroksesta koostuva maalipinnoite, jossa maalin tartunnat ovat puutteelliset. Näytteissä 2, 3, 4, 6, 7

ja 8 on ulkopinnassa taustabetonista rakenteeltaan poikkeava pesubetoniosuus, jonka kontakti taustabetoniin näytteissä 2 ja 3 on paikoin säröillyt auki. Näytteessä 4 pesubetoniosuus on irronnut. Näytteissä 6, 7 ja 8 pesubetonin ja taustabetonin raja ei ole selkeästi erotettavissa. Näytteissä 5 ja 8 ulkopinnassa on laastitasoite ja maalipinnoite. Muut julkisivunäytteet ovat kivirouhepinnalla.

Näytteiden kunto vaihtelee hyvästä heikkoon (rapautuneisuus 0-4). Pakkasrapautuminen heikentää näytteiden 1, 2, 3, 4 ja 5 kuntoa (rapautuneisuus 2-4). Näytteissä 6, 7 ja 8 ei puolestaan ole havaittavissa betonin kuntoa heikentäviä vaurioita. Sideaineen laatu on pääosin hyvä, pois lukien näyte 3, jossa havaittiin epätasaisuutta sideaineessa. Betonit ovat hyvin tiivistyneitä, mutta rapautuminen heikentää tiiveyttä ja aiheuttaa kiviaineen kontaktien aukeamista. Karbonatisoituminen on edennyt kohtalaisen syvälle näytteissä 1 ja 6. Näytteessä 8 karbonatisoituminen on edennyt koko lieriön läpi. Betonit ovat huokostamattomia. Rapautuneissa näytteissä huokosiin ja säröihin on kiteytynyt ettringiittiä ja karbonaattia, joka viittaa voimakkaaseen kosteusrasitukseen.

Tutkimuksessa suoritettiin vetolujuuskoe 15 näytteelle. Yksi näytteistä oli porattu sokkelista (näyte 1) ja loput 14 näytettä oli julkisivusta. Tulokset vaihtelevat 0,1 – 2,7 MN/m<sup>2</sup> välillä. Kahdeksan näytteen kohdalla suoritettiin uusintaveto, koska ensimmäinen vetokokeen tulos oli alle 1,5 MN/m<sup>2</sup>. Näytteet 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 13, 14 ja 15 ovat julkisivunäytteitä, joissa kaikissa on pesubetoniosuus. Näytteiden 2, 3, 4, 5, 8, 10 ja 13 tapauksissa murtuminen tapahtui pesubetonissa. Myös uusintavedon murtuminen tapahtui pääosin pesubetonissa. Kaikkiaan seitsemässä näytteessä murtokohdassa oli Ø3 mm teräs. Näytteen 12 ulkopinnassa oli tasoitelaasti, ja murtuminen tapahtui ensimmäisessä vedossa betonin ja tasoitelaastin rajapinnassa tuloksen ollessa 0,8 MN/m<sup>2</sup>. Toisella vedolla murtuminen tapahtui samasta kohdasta ja tulokseksi tuli 2,5 MN/m<sup>2</sup>. Neljässä seitsemästä pesubetoniosuuden sisältävissä näytteissä myös uusintavedon tulos jää alle 1,5 MN/m<sup>2</sup>.

Taulukko 8. Kohdetutkimus 3. Asuinkerrostalon ohuthietutkimuksen ja vetolujuuskoeistusten tulokset.

Ohuthienäyte	Rakenneosa/ pinta	Kunto	Rapautuneisuus (asteikko 0-4)
1	Sokkeli/ Ulkopinta	Heikko	4
2	Julkisivu/ Ulkopinta	11 mm ulkopinnasta heikko, muuten	3

		välttävä	
3	Julkisivu/ Ulkopinta	Heikko	4
4	Julkisivu/ Ulkopinta	Ulkopinnasta 20 mm heikko, muuten välttävä	3
5	Julkisivu/ Ulkopinta	Välttävä	2
6	Julkisivu/ Ulkopinta	Hyvä	0
7	Julkisivu/ Ulkopinta	Hyvä	0
8	Julkisivu/ Ulkopinta	Hyvä	0
Vetolujuusnäyte	Rakenneosa	Tulos ( MN/m <sup>2</sup> )	Murtokohta ja-tapa
1	Sokkeli	1,9	17-32 mm ulkopinnasta, pääosin myötäilee, murtokohdassa Ø5 mm teräs
2	Julkisivu, maalattu	0,7	9-20 mm ulkopinnasta, pääosin myötäilee, murto pesubetonin rajasta
2 uusinta	Julkisivu, maalattu	1,4	4-11 mm ulkopinnasta, pääosin leikkaa, murto pesubetonissa
3	Julkisivu, pesubetoni, ikkuna	1,2	10-21 mm ulkopinnasta, pääosin leikkaa, murto pesubetonissa, Ø3 mm teräs
3 uusinta	Julkisivu, pesubetoni, ikkuna	2,1	9-16 mm ulkopinnasta, pääosin leikkaa, murto pesubetonissa
4	Julkisivu, pesubetoni, ikkuna	0,9	12-22 mm ulkopinnasta, pääosin leikkaa, murto pesubetonissa
4 uusinta	Julkisivu, pesubetoni, ikkuna	2,1	19-26 mm ulkopinnasta, pääosin leikkaa, murto pesubetonin rajasta
5	Julkisivu, pesubetoni, ikkuna	2,2	13-21 mm ulkopinnasta, pääosin leikkaa, murto pesubetonissa
6	Kansilaatta/ Yläpinta	0,1	18-27 mm ulkopinnasta, myötäilee, Ø3 mm teräs
6 uusinta	Kansilaatta/ Yläpinta	0,4	9-20 mm ulkopinnasta, pääosin myötäilee, murto pesubetonissa, murtokohdassa teräkset 2 x Ø3 mm
7	Julkisivu, maalattu, ikkuna	2,1	15-26 mm ulkopinnasta, pääosin myötäilee
8	Julkisivu, pesubetoni, ikkuna	2,7	7-30 mm ulkopinnasta, pääosin leikkaa, murto pesubetonissa
9	Julkisivu, pesubetoni, ikkuna	1,1	29-40 mm ulkopinnasta, pääosin myötäilee

9 uusinta	Julkisivu, pesubetoni, ikkuna	1,0	21-34 mm ulkopinnasta, pääosin myötäilee, murto pesubetonissa, murtokohdassa Ø3 mm teräs
10	Julkisivu, pesubetoni, umpielementti	0,3	10-20 mm ulkopinnasta, pääosin myötäilee, murto pesubetonissa
10 uusinta	Julkisivu, pesubetoni, umpielementti	0,4	21-41 mm ulkopinnasta, pääosin myötäilee
11	Julkisivu, pesubetoni, ikkuna	1,3	32-47 mm ulkopinnasta, pääosin myötäilee
11 uusinta	Julkisivu, pesubetoni, ikkuna	2,1	16-31 mm ulkopinnasta, pääosin leikkaa, murto tasoitelaastin rajasta, murtokohdassa Ø3 mm teräs
12	Julkisivu, maalattu, ikkuna	0,8	3-16 mm ulkopinnasta, pääosin leikkaa, murto tasoitelaastin rajasta, Ø3 mm teräs
12 uusinta	Julkisivu, maalattu, ikkuna	2,5	3-11 mm ulkopinnasta, pääosin leikkaa, murto tasoitelaastissa, murtokohdassa Ø3 mm teräs
13	Julkisivu, pesubetoni, umpielementti	2,1	2-9 mm ulkopinnasta, pääosin leikkaa, murto pesubetonissa
14	Julkisivu, pesubetoni, ikkuna	2,6	10-27 mm ulkopinnasta, pääosin myötäilee, Ø3 mm teräs
15	Julkisivu, pesubetoni, umpielementti	1,5	17-28mm ulkopinnasta, pääosin myötäilee

#### 7.4 Kohdetutkimus 4, kuivatelakka

Kuntotutkimuksessa näytteenotto suoritettiin siten, että ohuthie- ja vetolujuusnäytteet porattiin vierekkäin. Tämä mahdollistaa saatujen tulosten vertailun, koska tulosten voidaan olettaa korreloivan keskenään.

Ohuthietutkimuksia varten porattiin seitsemän näytekappaletta. Betonien kunto vaihtelee hyvästä välttävään (rapautuneisuus 0-3). Laadultaan ja tiivistymiseltään betonit ovat pääosin onnistuneita, mutta näytteen 7 tiivistyminen on puutteellista. Sideaineen laatu on melko hyvä, vaikkakin vesi-sementtisuhde on alhainen. Kiviaineen tartunnat ovat pääosin enintään tyydyttävät johtuen kosteusrasituksesta sekä pakkas- ja ettringiittirapautumisesta. Myös lievää vedenerottumista havaittiin kiviaineen pinnoilla.

Betonien huokostus on puutteellista ja niiden ulkopinnoissa havaittiin pakkasvaurioita, jotka heikentävät betonin lujuutta ja säilyvyyttä. Huokosiin oli kiteytynyt kosteusrasituksesta aiheutuneita ettringiitti ja kalsiumhydroksidikiteymiä.

Näytteissä 3 ja 5 oli kunnoltaan kaksi erilaista osuutta. Näytteen 3 ulkopinnasta 0-12 mm etäisyydellä betonin kunto oli välttävä ja 12-48 mm tyydyttävä. Näytteessä 5 puolestaan 0-20 mm etäisyydellä ulkopinnasta betonin kunto oli välttävä ja 20-48 mm ulkopinnasta tyydyttävä.

Näytteiden 1 ja 4 kunto oli hyvä. Näytteessä 1 havaittiin hieman kuivumiskutistumatyyppistä suuntaumatonta, leveydeltään alle 0,01 mm mikrosäröilyä. Muuta mikrosäröilyä ei havaittu. Suuntaumatonta mikrosäröilyä havaittiin näytteissä 1, 2, 3, 5, 6 ja 7. Pinnansuuntaista mikrosäröilyä havaittiin näytteissä 2, 3, 5.

Vetokoetta varten kohteesta porattiin seitsemän lieriötä. Tulokset vaihtelevat välillä 0,1-3,2 MN/m<sup>2</sup>. Uusintaveto suoritettiin näytteille 2, 5 ja 6. Näytteen 2 ensimmäisen vetokokeen tulos oli 0,1 MN/m<sup>2</sup> ja toisen 0,2 MN/m<sup>2</sup>. Murtokohdat olivat 34-51 mm ja 18-38 mm etäisyydellä ulkopinnasta. Molemmissa murtokohdissa havaittiin kiteytymää. Näytteen 5 ensimmäisen vetokokeen tulos oli 1,2 MN/m<sup>2</sup> ja toisen 1,5 MN/m<sup>2</sup>. Murtumiset tapahtuivat 17-26 mm ja 26-38 mm etäisyydellä ulkopinnasta. Ensimmäisen vetokokeen murtopinnassa havaittiin viitteitä alkalikiviainesreaktiosta. Näytteen 6 ensimmäisen vetokokeen tulos oli 1,4 MN/m<sup>2</sup> ja toisen 1,9 MN/m<sup>2</sup>. Murtokohdat sijaitsivat 33-42 mm ja 35-45 mm etäisyydellä ulkopinnasta. Jokaisen kolmen lieriön ensimmäisen ja toisen vetokokeen murtopinnat sijaitsivat ainakin osittain samalla syvyydellä molemmilla vetokerroilla. Tämä viittaa siihen, että voimakkaimmin vaurioitunut kohta sijaitsee kyseisellä syvyydellä betonin pinnasta.

Taulukko 9. Kohdetutkimus 4. Kuivatelakan ohuthietutkimuksen ja vetolujuuskoeistusten tulokset.

Ohuthienäyte	Rakenneosa/ pinta	Kunto	Rapautuneisuus (asteikko 0-4)
1	Pohjalaatta/ Ulkopinta	Hyvä	0
2	Pohjalaatta/ Ulkopinta	Tyydyttävä	1

3	Pohjalaatta/ Ulkopinta	0-12 mm välttävä, 12-48 mm tyydyttävä	2
4	Pohjalaatta/ Ulkopinta	Hyvä	0
5	Pohjalaatta/ Ulkopinta	0-20 mm välttävä, 20-48 tyydyttävä	3
6	Pohjalaatta/ Ulkopinta	Tyydyttävä	1
7	Pohjalaatta/ Ulkopinta	Tyydyttävä	0
Vetolujuusnäyte	Rakenneosa	Tulos ( MN/m <sup>2</sup> )	Murtokohta ja-tapa
1	Pohjalaatta/ Ulkopinta	1,6	31-37 mm ulkopinnasta, myötäilee
2	Pohjalaatta/ Ulkopinta	0,1	34-51 mm ulkopinnasta, myötäilee, murtopinnassa kiteytymää
2 uusinta	Pohjalaatta/ Ulkopinta	0,2	18-38 mm ulkopinnasta, myötäilee, murtopinnassa kiteytymää
3	Pohjalaatta/ Ulkopinta	1,9	2-30 mm ulkopinnasta, pääosin myötäilee, murtopinnassa kiteytymää
4	Pohjalaatta/ Ulkopinta	3,1	41-50 mm ulkopinnasta, pääosin myötäilee
5	Pohjalaatta/ Ulkopinta	1,2	17-26 mm ulkopinnasta, pääosin myötäilee, viitteitä AKR
5 uusinta	Pohjalaatta/ Ulkopinta	1,5	26-38 mm ulkopinnasta, pääosin leikkaa
6	Pohjalaatta/ Ulkopinta	1,4	33-42 mm ulkopinnasta, pääosin leikkaa
6 uusinta	Pohjalaatta/ Ulkopinta	1,9	35-45 mm ulkopinnasta, pääosin leikkaa
7	Pohjalaatta/ Ulkopinta	3,2	1-5 mm ulkopinnasta, pääosin myötäilee

## 7.5 Kohdetutkimus 5, alikulkusilta

Kohteesta porattiin 21 näytekappaletta ohuthietutkimuksia ja 22 näytekappaletta vetolujuuskoeistuksia varten. Tähän työhön valittiin tarkasteluun 16 kappaletta ohuthieitä ja 16 vetolujuuskoeistusta, koska niiden näytteenottoaikat sijaittivat pareittain siten, että vierekkäin oli porattu näytteet sekä ohuthietutkimukseen että vetolujuuskoeistukseen.

Aineiston rajaamisella pyrittiin saavuttamaan tämän työn kannalta tarpeelliseksi katsottu materiaali.

Ohuthietutkimuksia tehtiin alikulkusillan kansilaatalle, pääkannattaja- ja reunapalkille sekä alusrakenteille. Kansilaatta tutkittiin seitsemällä ohuthieellä, jotka tehtiin yläpinnasta. Ohuthietutkimusten mukaan osassa kansilaatan betoneissa (näytteet 4, 5 ja 7) on havaittavissa alkalikiviainesreaktiota (rapautuneisuus 2-3), joka heikentää paikallisesti betonin kuntoa. Myös heikohkoa ja jatkumatonta kuivumiskutistumisen aiheuttamaa mikrosäröilyä havaittiin. Betonit ovat huokostamattomia, eli ne eivät ole huokosrakenteensa perusteella pakkasenkestäviä kosteissa olosuhteissa. Yksittäinen pakkasrapautuman aiheuttama särö havaittiin näytteen 2 yläpinnassa (rapautuneisuus 2). Lisäksi osassa näytteissä havaittiin kosteusrasitusta indikoivaa ettringiittikiteymää yksittäisissä huokosissa. Myös alkalipiigeeliä esiintyi yksittäisissä huokosissa ja mikrosäröissä. Kansilaatan yläpinnan betonien kunto vaihteli hyvästä heikkoon (rapautuneisuus 0-3). Näytteet 1, 3 ja 6 olivat kunnoltaan hyviä. Näyte 2 oli yläpinnasta 0-4 mm etäisyydellä kunnoltaan heikko ja etäisyydellä 4-48 mm hyvä. Näyte 4 puolestaan oli välttävä etäisyydellä 0-30 mm yläpinnasta, mutta hyvä etäisyydellä 30-48 mm. Näytteen 7 kunto oli välttävä etäisyydellä 0-35 mm yläpinnasta, mutta muuttui hyväksi tästä syvemmälle mentäessä.

Ohuthienäytteillä 22 ja 24 tutkittiin pääkannattajan sivupintaa ja näytteillä 31 ja 33 reunapalkkien ulkopintaa. Näytteen 22 kunto oli tyydyttävä (rapautuneisuus 2) koko hieen alalla ja sen lävisti voimakas pintaa vasten kohtisuora halkeama. Näytteen 24 kunto oli hyvä, mutta karbonatisoituminen oli edennyt epätasaisesti kohtalaisen syvälle. Näytteen 31 kunto oli tyydyttävä (rapautuneisuus 2), kun taas näytteen 33 kunto oli hyvä. Näytteessä 31 havaittiin lievää vedenerottumista ja näytteessä 33 oli viitteitä alkalikiviainesreaktiosta, mutta sen aiheuttamia vaurioita ei havaittu. Kaikkien näytteiden ulkopinnassa oli laastipinnoite, jonka tartunta betoniin oli hyvä.

Alusrakenteet, eli välituki ja päätytuet tutkittiin yhteensä viidellä ohuthieellä. Välituen näytteet 42 ja 46 olivat kunnoltaan hyviä. Näytteen 47 kunto välillä 0-26 mm ulkopinnasta oli tyydyttävä (rapautuneisuus 0), muuten hyvä. Päätytuki näytteet 51 ja 53 olivat kunnoltaan hyviä. Betoneissa havaittu heikko mikrosäröily ei ole jatkuvaa ja on pääosin kuivumiskutistumisen aiheuttamaa. Näytteessä 53 havaittiin alkalikiviainesreaktion

aiheuttamia yksittäisiä mikrosäröjä (rapautuneisuus 1) ja alkalipiigeeliä.

Vetolujuuskokeet tehtiin samoille rakenteille kuin ohuthietutkimukset. Vetokokeiden tulosten vaihteluväli oli 0,5 – 3,3 MN/m<sup>2</sup>. Kansilaatan yläpintaa testattiin näytteillä 1-7, joista ainoastaan näytte 2 ylitti rajan 1,5 MN/m<sup>2</sup> ensimmäisellä koeistuksella tuloksen ollessa 2,1 MN/m<sup>2</sup>. Näytteet 2-7 vedettiin uudestaan, jolloin näytteen 4 tulokseksi tuli 1,3 MN/m<sup>2</sup> ja näytteen 6 tulokseksi 1,4 MN/m<sup>2</sup>. Näytteet 1, 3, 5 ja 7 ylittivät 1,5 MN/m<sup>2</sup>. Näytteiden 1, 3, 4, 5, 6 ja 7 murtopinnoissa oli viitteitä alkalikiviainesreaktiosta.

Näytteet 21 ja 23 oli porattu pääkannattajasta ja näytteet 32 ja 34 reunapalkista. Näytteen 21 tulos oli 0,6 MN/m<sup>2</sup>. Murtuminen tapahtui kiven kohdalla, joka oli noin 60 % näytteen halkaisijasta ja murtokohdassa oli viitteitä alkalikiviainesreaktiosta. Uusintavedossa tulos oli 1,9 MN/m<sup>2</sup>. Näytteen 23 tulos oli ensimmäisellä vetokerralla 3,3 MN/m<sup>2</sup>. Reunapalkkinäytteen 32 tulos oli 2,8 MN/m<sup>2</sup>. Näytteen 34 tulos jäi ensimmäisellä vetokerralla 1,2 MN/m<sup>2</sup> ja murtokohdassa oli viitteitä alkalikiviainesreaktiosta. Toisen vetokerran tulos oli 1,4 MN/m<sup>2</sup>.

Välituista porattujen näytteiden tulokset ylittivät ensimmäisessä vetokokeessa arvon 1,5 MN/m<sup>2</sup>. Päätytukinäytteet 52 ja 54 puolestaan alittivat arvon. Näytteen 52 murtopinnoissa oli molemmilla kerroilla viitteitä alkalikiviainesreaktiosta.

Taulukko 10. Kohdetutkimus 5. Alikukusillan ohuthietutkimuksen ja vetolujuuskoeistusten tulokset.

Ohuthienäyte	Rakenneos/ pinta	Kunto	Rapautuneisuus (asteikko 0-4)
1	Kansi/ Yläpinta	Hyvä	0
2	Kansi/ Yläpinta	0-4 mm heikko, 4-48 mm hyvä	2
3	Kansi/ Yläpinta	Hyvä	0
4	Kansi/ Yläpinta	0-30 mm välttävä, 30-48 mm hyvä	3
5	Kansi/ Yläpinta	Tyydyttävä	2
6	Kansi/ Yläpinta	Hyvä	0
7	Kansi/ Yläpinta	0-35 mm välttävä, 35-48 mm hyvä	2



22	Pääkannattaja/ Sivupinta	Tyydyttävä	2
24	Pääkannattaja/ Sivupinta	Hyvä	0
31	Reunapalkit/ Ulkopinta	Tyydyttävä	2
33	Reunapalkit/ Ulkopinta	Hyvä	0
42	Välituki/ Ulkopinta	Hyvä	0
46	Välituki/ Ulkopinta	Hyvä	0
47	Välituki/ Ulkopinta	0-26 mm tyydyttävä, 27-48 mm hyvä	0
51	Päätytuet/ Ulkopinta	Hyvä	0
53	Päätytuet/ Ulkopinta	Hyvä	1
<b>Vetolujuusnäyte</b>	<b>Rakenneosa</b>	<b>Tulos ( MN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Murtokohta ja-tapa</b>
1	Kansi/ Yläpinta	1,4	12-30 mm yläpinnasta, pääosin leikkaa, viitteitä AKR
1 uusinta	Kansi/ Yläpinta	2,7	23-40 mm yläpinnasta, pääosin leikkaa
2	Kansi/ Yläpinta	2,1	33-44 mm yläpinnasta, pääosin myötäilee
3	Kansi/ Yläpinta	1,4	34-56 mm ulkopinnasta, pääosin myötäilee, viitteitä AKR
3 uusinta	Kansi/ Yläpinta	1,8	9-19 mm yläpinnasta, pääosin myötäilee
4	Kansi/ Yläpinta	1,1	56-83 mm yläpinnasta, pääosin leikkaa, viitteitä AKR
4 uusinta	Kansi/ Yläpinta	1,3	15-34 mm yläpinnasta, pääosin myötäilee, viitteitä AKR
5	Kansi/ Yläpinta	1,3	17-44 mm yläpinnasta, pääosin myötäilee, viitteitä AKR
5 uusinta	Kansi/ Yläpinta	2,8	7-30 mm yläpinnasta, pääosin myötäilee
6	Kansi/ Yläpinta	1,3	52-63 mm yläpinnasta, pääasiassa myötäilee, viitteitä AKR
6 uusinta	Kansi/ Yläpinta	1,4	5-33 mm yläpinnasta, pääosin myötäilee

7	Kansi/ Yläpinta	0,8	3-18 mm yläpinnasta, pääosin leikkaa, viitteitä AKR
7 uusinta	Kansi/ Yläpinta	2,0	3-18 mm yläpinnasta, pääosin myötäilee
21	Pääkannattaja/ Sivupinta	0,6	58-80 mm sivupinnasta, pääosin leikkaa, viitteitä AKR
21 uusinta	Pääkannattaja/ Sivupinta	1,9	4-10 mm sivupinnasta, pääosin myötäilee
23	Pääkannattaja/ Sivupinta	3,3	30-39 mm sivupinnasta, pääasiassa myötäilee
32	Reunapalkit	2,8	20-39 mm ulkopinnasta, pääasiassa myötäilee, viitteitä AKR
34	Reunapalkit	1,2	12-42 mm ulkopinnasta, pääasiassa myötäilee, viitteitä AKR
34 uusinta	Reunapalkit	1,4	2-13 mm ulkopinnasta, pääosin myötäilee
43	Välituet	1,9	26-40 mm ulkopinnasta, pääosin myötäilee
45	Välituet	1,9	53-66 mm ulkopinnasta, pääasiassa myötäilee
48	Välituet	2,8	23-35 mm ulkopinnasta, pääasiassa myötäilee
52	Päätytuet	0,5	46-64 mm ulkopinnasta, pääosin leikkaa, viitteitä AKR
52 uusinta	Päätytuet	1,1	6-27 mm ulkopinnasta, pääosin myötäilee, viitteitä AKR
54	Päätytuet	1,4	10-25 mm ulkopinnasta, pääosin myötäilee
54 uusinta	Päätytuet	1,6	18-39 mm ulkopinnasta, pääosin myötäilee

## 8. TULOSTEN TARKASTELU

### 8.1 Kohdetutkimus 1, maantiesilta (rapautumista ja viitteitä alkalikiviainesreaktiosta)

Ohuthietutkimuksissa havaittiin betonin rapautumista ja säröilyä kahdessa näytteessä. Muut näytteet olivat ohuthietutkimuksen perusteella kunnoltaan hyvät.

Vetolujuuskokeessa osa tuloksista on alhaisia, joka viittaa rapautumiseen. Ohuthietutkimuksen perusteella kunnoltaan ja rapautuneisuudeltaan heikoimpien näytteiden vetolujuuskokeet olivat myös heikoimmat. Ohuthietutkimuksen perusteella hyväkuntoisten betonien vetolujuuskokeen tulokset olivat hyvät. Näytteen 1 ensimmäisessä vetokokeessa murtuminen tapahtui lakkapinnan ja betonin tartunnasta alhaisella tuloksella, mutta uusintavedossa murtuminen tapahtui betonissa ja tulos oli hyvä. Ohuthietutkimus ja vetolujuuskoeistus tukevat siis toisiaan.

## **8.2 Kohdetutkimus 2, vesistön ylittävä maantiesilta (pakkasrapautumista ja alkalikiviainesreaktiota)**

Ohuthietutkimuksissa osassa näytteissä havaittiin heikohkoa pakkasen ja alkalikiviainesreaktion aiheuttamaa mikrosäröilyä. Voimakkaimmin rapautuneita ja kunnoltaan heikoimpia olivat näytteet 1 ja 8 (rapautuneisuus 3). Näytteessä 1 havaittiin koko hieen (0-48 mm) alalla voimakkuudeltaan vaihtelevaa mikrosäröilyä. Näytekappaleessa havaittiin 50 mm etäisyydellä yläpinnasta pinnansuuntainen katkeama stereomikroskoopilla. Vetolujuuskokeessa molemmilla vetokerroilla tulokseksi saatiin  $0,5 \text{ MN/m}^2$  murtopinnan ollessa samalla etäisyydellä ulkopinnasta, jossa ohuthieen voimakkaimmat säröt havaittiin. Myös näytteen 8 molemmat murtokohdat sijaitsevat samalla etäisyydellä yläpinnasta, jossa voimakkaimmat vauriot todettiin ohuthietutkimuksessa. Ohuthietutkimuksissa kunnoltaan hyväksi todettuja betoneita vastaavat vetolujuuskokeet olivat poikkeuksetta hyviä.

## **8.3 Kohdetutkimus 3, asuinkerrostalo (pakkasrapautuminen)**

Ohuthietutkimuksissa näytteiden kunto vaihteli hyvästä heikkoon. Pakkasrapautumisen aiheuttamaa voimakasta betonin kuntoa heikentävää säröilyä havaittiin useissa näytteissä. Osassa näytteistä voimakas rapautuminen rajoittuu ohuthieen alalle noin 0-29 mm ulkopinnasta, mutta joissakin näytteissä rapautuminen ulottuu koko näytekappaleen läpi. Myös lievempää pinnansuuntaista säröilyä havaittiin useissa näytteissä koko hieen alalla. Osassa näytteistä on kiviaineeltaan erikoostumuksellinen pesubetoniosuus, jonka paksuus vaihtelee 20-30 mm välillä. Pesubetonin ja taustabetonin välinen tartunta on osin puutteellinen.

Vetolujuuskokeissa saadut tulokset ovat pääosin heikkoja, mikä viittaa voimakkaaseen rapautumiseen. Murtumiskohta on pesubetoninäytteissä taustabetonin ja pesubetonin rajapinnassa tai pesubetonissa. Ohuthietutkimuksissa havaittu voimakas rapautuminen sekä pesu- ja taustabetonin välinen puutteellinen tartunta tukevat vetokoetuloksia. Vetokokeissa murtuminen tapahtui pääosin 10-30 mm etäisyydellä pinnasta. Ohuthietutkimusten perusteella vauriot jatkuvat syvemmälle.

Tässä tapauksessa vetolujuuskoe kertoo (näytteet 1 ja 7 pois lukien) pesubetoniosuuden eikä taustabetonin vetolujuutta. Tämä johtuu siitä, että pesubetoniosuuden vetolujuus ylittyy ennemmin kuin taustabetonin. Ohuthietutkimuksella saadaan tärkeää tietoa kohteen taustabetonien kunnosta, josta vetolujuuskokeet tulokset eivät kerro.

#### **8.4 Kohdetutkimus 4, kuivatelakka (laatu, pakkasrapautuminen ja ettringiitti)**

Ohuthietutkimuksissa havaittiin kaikissa näytteissä (pois lukien näyte 4) vähän – jonkin verran suuntautumaton ja pinnansuuntaista mikrosäröilyä (rapautuneisuus 0-3). Mikrosäröilyä esiintyi tiheimmin pääasiassa 0-20 mm etäisyydellä ulkopinnasta. Ohuthieraportissa tieto mikrosäröilyn tarkemmasta sijainnista puuttui joidenkin näytteiden kohdalla. Vetolujuuskokeessa jokaisen näytteen kohdalla murtuminen tapahtui alle 48 mm ulkopinnasta, eli etäisyydellä, jonka ohuthie kattaa. Ohuthietutkimuksissa tehdyt havainnot tukevat pääosin hyvin vetolujuuskokeiden tuloksia, vaikkakaan murtuminen vetolujuuskokeessa ei vastaa aina sijainniltaan ohuthieessä tehtyjä havaintoja vaurioituneimmasta kohdasta. Ohuthietutkimuksissa kunnoltaan hyviksi arvioidut betonit antoivat korkeimmat vetolujuudet, kun puolestaan kunnoltaan tyydyttävät ja heikot betonit antoivat alhaisimmat tulokset. Ohuthieraportin paikoin vajavaiset tiedot vaurioiden esiintymissyvyydestä vaikeuttavat vertailua.

#### **8.5 Kohdetutkimus 5, alikulkusilta (alkalikiviainesreaktio)**

Ohuthietutkimuksissa havaittu säröily liittyi vain yhdessä näytteessä pakkasrapautumaan. Tämä ei johtanut heikkoon vetolujuustulokseen, eikä vaikuttanut myöskään murtumakohdan sijaintiin. Alkalikiviainesreaktion aiheuttamaa säröilyä havaittiin

kolmessa kansilaatan näytteessä. Kansilaatan vetolujuuskokeissa puolestaan havaittiin viitteitä alkalikiviainesreaktiosta kuuden kappaleen murtopinnalla. Alkalikiviainesreaktiota ei joko ole esiintynyt niissä kohdissa betonia, joista hieet on tehty, tai se on jäänyt huomaamatta ja siten kirjaamatta ohuthieraporttiin. Lisäksi ohuthieissä havaittiin heikompaa jatkumatonta mikrosäröilyä, joka oli yleensä kuivumiskutistuman aiheuttamaa. Tämän tyyppisen mikrosäröilyn sijaintia ei ilmoitettu raportissa. Kunnoltaan ja rapautuneisuudeltaan kannen betonit olivat heikoimpia (rapautuneisuus 0-3), mutta rapautuneisuutta esiintyi myös pääkannattajan ja reunapalkkien betoneissa (rapautuneisuus 0-2).

Vetolujuuskokeen tulokset ja ohuthieraporttiin merkitty näytteen kunto sekä arvio rapautuneisuudesta ovat usein samansuuntaisia, mutta poikkeuksiakin löytyy. Esimerkiksi, kun betonin rapautuneisuusluokka oli 0, oli vetolujuus joissakin tapauksissa alle 1,5 MN/m<sup>2</sup>. Toisaalta, kun rapautuneisuusluokka oli 2, niin vetolujuusarvo oli yllättävän korkea, jopa 2,8 MN/m<sup>2</sup>. Myös murtumakohdat eroavat paikoin ohuthieessä havaittujen vaurioiden sijainneista. Tämä ei sinällään ole kuitenkaan epävarmuustekijä, koska vetolujuuskokeessa murtuminen tapahtuu kappaleen heikoimmasta kohdasta, jonka määrittämiseen ohuthietutkimus ei ole oikea menetelmä. Ohuthietutkimusten lisäksi erityisesti vetolujuuskappaleiden murtopinnoilla havaittiin useissa tapauksissa viitteitä alkalikiviainesreaktiosta, joka on arvokasta tietoa kohteen tilanteesta. Suorittamalla lisää ohuthietutkimuksia voitaisiin tarkentaa ja saada parempi käsitys siitä, kuinka yleistä ja pitkälle edennyttä alkalikiviainesreaktio kyseisessä kohteessa on.

## **9. KESKUSTELU**

Osana työn tarkoitusta oli tuoda esille näkökulmia Labroc Oy:n ohuthietutkimus- ja vetolujuuskoeistusmenetelmien kehittämistä sekä yhdenmukaisemmasta ja vertailukelpoisemmasta raportoinnista.

Labroc Oy:n ohuthietutkimuksen raportoinnissa ilmeni tulkinnallisuutta. Tällä hetkellä ohuthieraportissa annetaan tutkitun betonin rapautuneisuudelle numeerinen arvo (0-4) ja sitä vastaava sanallinen kuvaus (ei rapautumaa – vähäistä – orastavaa - kohtalaista –

voimakasta). Käytössä olevassa ohuthieraportissa tutkimuksen tilaajalle ei kuitenkaan käy selväksi, millä perustein arvio rapautuneisuudesta määritetään. Se olisi hyödyllistä tietää, jotta rapautuneisuuden ja laatuutteiden arvioinnista olisi tilaajalle mahdollisimman paljon hyötyä.

Ohuthietutkimusten ja vetolujuuskoeistuksen arviointiasteikkojen yhtenäistäminen helpottaisi tulosten vertailua. Rapautuneisuutta ja oletettua vetolujuustulosta voisi kuvata suppeammalla ja informatiivisemmalla neliportaisella asteikolla (Taulukko 11), joka huomioi myös arvion rapautuneisuuden vaikutuksesta vetolujuuteen sekä betonin kunnon. Tällaista asteikkoa on kirjallisuudessaakin käytetty, mutta siinä ei ole annettu rapautumisasteelle numeerista arvoa eikä se myöskään huomioi betonin kuntoa. Rapautuneisuuden arvon ollessa 0, ei rapautuminen olisi todennäköistä ja vetolujuus olisi yli 1,5 MN/m<sup>2</sup>. Rapautuneisuuden ollessa 1, olisi rapautuneisuus jonkinasteista ja vetolujuus 1,0-1,5 MN/m<sup>2</sup>. Rapautuneisuuden ollessa 2, olisi rapautuneisuus kohtalaista ja vetolujuus 0,5-1,0 MN/m<sup>2</sup>. Rapautuneisuuden ollessa 3, olisi vetokokeen oletettava tulos noin 0,5 MN/m<sup>2</sup> tai alle. Toisena mahdollisuutena olisi käyttää kolmiportaista asteikkoa (Taulukko 12), mutta ohuthietutkimuksella saatava informaatio jää siinä vähäisemmäksi. Vetolujuuden arvio ohuthietutkimuksen perusteella on suuntaa antava, joten vetokoeistuksia tulee joka tapauksessa suorittaa.

Taulukko 11. Ehdotelma ohuthietutkimuksessa todetun rapautuneisuuden arvon ja vetolujuuskokeen tuloksen yhtenäistämiseen sopivasta neliportaisesta taulukosta. (Antti Autere)

Rapautuneisuus	Kunto	Vetolujuus
0 – Ei rapautumista	Hyvä	>1,5 MN/m <sup>2</sup>
1 - Jonkinasteista	Tyydyttävä	1,0-1,5 MN/m <sup>2</sup>
2 – Kohtalaista	Välttävä	0,5-1,0 MN/m <sup>2</sup>
3 - Voimakasta	Heikko	<0,5 MN/m <sup>2</sup>

Taulukko 12. Ehdotelma ohuthietutkimuksessa todetun rapautuneisuuden arvon ja vetolujuuskokeen tuloksen yhtenäistämiseen sopivasta kolmiportaaisesta taulukosta. (Antti Autere)

Rapautuneisuus	Kunto	Vetolujuus
0 – Ei rapautumista	Hyvä	>1,5 MN/m <sup>2</sup>
1 - Jonkinasteista	Tyydyttävä	0,5-1,0 MN/m <sup>2</sup>
2 - Voimakasta	Heikko	<0,5 MN/m <sup>2</sup>

Ohuthietutkimuksen etuna vetolujuuskoestukseen nähden on se, että vaurioitumissyvyys ja vaurioiden esiintyminen sekä voimakkuus ovat selvitettävissä. Tämä kuitenkin edellyttää, että ohuthie on valmistettu järkevästä kohdasta näytekappaleelta. Tapauksissa, joissa näytekappaleen pinta on silminnähten rapautunutta, ei ohuthietä ole aina viisainta tehdä heti ylä-/ulkopinnasta lähtien. Ohuthieeseen olisi kannattavaa jättää hieman voimakkaasti rapautunutta osaa, sekä sellaista, josta ei paljain silmin nähdä rapautumisen merkkejä. Tällä tavoin voidaan löytää rapautuneen ja rapautumattoman betonin raja, joka on kuntotutkimuksissa ja korjausrakentamisessa tärkeimpiä tietoja.

Alkalikiviainesreaktiotapauksissa vetolujuuskoe on hyvä tuki ohuthietutkimukselle, koska murtopinnat paljastavat usein alkalikiviainesreaktion esiintymisen syvemmältä kuin mistä ohuthie on tehty. Mikäli alkalikiviainesreaktiosta tehdään silmämääräinen havainto näytekappaleesta ohuthieen kattavan alueen ulkopuolelta, kannattaisi reaktion todentamiseksi tehdä toinen ohuthie kyseiseltä kohdalta.

Vetolujuuskokeen alhainen tulos ja yksi uusintavetokoe eivät kerro mille syvyydelle vauriot päättyvät. Ne kertovat vain kappaleen heikoimman tai heikoimmat kaksi kohtaa, mutta raja rapautuneen ja rapautumattoman betonin välillä voi jäädä selvittämättä. Toisaalta vetolujuuskoe antaa viitteitä syvyydestä, johon vauriot ylettyvät, vaikka ohuthie ei kattaisi kyseistä syvyyttä. Edellä mainitussa tilanteessa tilaajalle olisi järkevää tarjota mahdollisuutta tehdä toinen ohuthie edellistä syvemmältä vaurioiden selvittämiseksi.

## **10. JOHTOPÄÄTÖKSET**

Betonin kuntotutkimuksissa ohuthietutkimusten ja vetolujuuskokeiden tulokset korreloivat voimakkaimmin sellaisissa tilanteissa, joissa ohuthieessä on havaittu betonin kuntoa selkeästi heikentäviä vaurioita (rapautuneisuus 3-4) ja vaurioiden sijainti on ilmoitettu. Vetolujuuskokeessa kappaleen murtuminen tapahtuu usein ainakin osin vastaavalla etäisyydellä pinnasta, jossa voimakkaimmat vauriot on havaittu. Betonin ollessa hyväkuntoista ja rapautumatonta tai rapautumisen ollessa vähäistä (rapautuneisuus 0-1) on murtumiskohdissa hajontaa. Ohuthietutkimuksessa annettu arvio betonin rapautuneisuudesta ja kuvaukset vaurioista korreloivat monissa tapauksissa vetolujuuskokeen tuloksen kanssa. Kunnoltaan hyvän betonin (rapautuneisuus 0)

vetolujuus on yleisesti hyvä ( $>1,5 \text{ MN/m}^2$ ). Rapautuneisuuden arvon kasvaessa vetolujuus puolestaan pääosassa tapauksista heikkenee. Labroc Oy:ssa käytössä oleva rapautuneisuutta kuvaava asteikko on viisiportainen (0-4). Tutkimusta tehdessä havaittiin, että rapautuneisuuden kasvaessa vetolujuustulos ei kuitenkaan aina heikkene loogisesti. Tähän vaikuttavat muun muassa betonin laadulliset seikat.

Betonin vauriomekanismeista alkalikiviainesreaktio ei esiinny säännönmukaisesti betonin pinnasta edeten, vaan sitä voi esiintyä useilla syvyyksillä. Tämä vaikeuttaa ohuthietutkimuksen ja vetolujuuskoeistuksen vertailua, koska se aiheuttaa vetolujuuskokeen murtokohtien hajontaa. Tutkimuksen aikana kävi selväksi, että mikäli kappaleessa esiintyy alkalikiviainesreaktiota, tapahtuu murtuminen usein sellaisesta kohdasta, jossa on havaittavissa viitteitä alkalikiviainesreaktiosta. Monissa tapauksissa havainto alkalikiviainesreaktiosta ja sen esiintymissyvyydestä oli kirjattu ohuthieraporttiin. Useissa tapauksissa vetolujuuskokeessa murtopinnassa havaittiin kuitenkin viitteitä alkalikiviainesreaktiosta, vaikka ohuthieraportissa ei ollut mainintaa kyseisestä vauriomekanismista. Tämä voi tarkoittaa sitä, että alkalikiviainesreaktiota ei ole esiintynyt alalla, jonka ohuthie kattaa, tai sitä ei oltu tutkimuksessa havaittu. Yleisesti ottaen ohuthietutkimuksen etuna kuitenkin on, että vaurioitumissyvyys ja vaurioiden esiintyminen sekä voimakkuus ovat selvitettävissä.

## **11. KIITOKSET**

Sain idean Pro gradu -työni aiheesta työnantajani Labroc Oy:n palveluksessa. Labroc Oy on betonin ja haitta-aineiden analysointiin erikoistunut laboratorio. Haluan kiittää esimiehiäni mahdollisuudesta tehdä Pro gradu -työ mielenkiintoisesta aiheesta. Erityisen lämpimät kiitokset kuuluvat FM Tapani Arolalle erinomaisesta ohjauksesta ja hyvistä neuvoista. Lisäksi haluan kiittää perhettäni ja avopuoliso Kirsi Tuulaniemeä kirjoittamisen aikana saamastani tuesta.



## 12. LÄHDELUETTELO

- Alonso, C., Andrade, C., Castellote, M., Castro, P., 2000. Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar. *Cement and Concrete Research*, Vol. 30. s. 1047-1055.
- Anttila, V., 2010. Betonin kutistuma ja sen huomioiminen. [Verkkajulkaisu]. *Rudus info* 1/2010, Helsinki 2010. [Viitattu 27.11.2017]. <[https://moodle.xamk.fi/pluginfile.php/813658/mod\\_folder/content/0/4.Täydentävää%20mat\\_eriaalia/2010-1%20Betonin%20kutistuma%20ja%20sen%20huomioiminen-1.pdf](https://moodle.xamk.fi/pluginfile.php/813658/mod_folder/content/0/4.Täydentävää%20mat_eriaalia/2010-1%20Betonin%20kutistuma%20ja%20sen%20huomioiminen-1.pdf)>
- Bakker, R., 1988. Initiation period in corrosion of steel in concrete. Schiessl, P. (toim.), *Corrosion of steel in concrete*. Chapman and Hall, London. s. 22-55.
- Betoni.com, 2017. [WWW-lähde]. [Viitattu 5.10.2017] <<http://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/betoni-rakennusmateriaalina/kaytto-talonrakentamisessa/>>
- Colleparidi M., 1999. Damage by delayed ettringite formation. *ACI's Concrete International*, January 1999. s. 6.
- Dalgleish, B. J., Pratt, P. L., Toulson, E., 1982a. Fractographic Studies of Microstructural Development in Hydrated Portland Cement. *J. Mater. Sci.* 17. s. 2199–2207.
- Dalgleish, B. J., Ghose, A., Jennings, H. M. & Pratt, P. L., 1982b. The Correlation of Microstructures with Setting and Hardening in Cement Paste. *International Conference on Concrete at Early Ages*, Paris. s. 137 –143.
- Deng, M., Tang, M., 1994. Formation and expansion of ettringite crystals. *Cement and Concrete Research* 24. s. 119-126.
- Escadeillas, G., Aubert, J.E., Segerer, M., Prince, W., 2007. Some factors affecting delayed ettringite formation in heat-cured mortars. *Cement and Concrete Research* 37. s. 1445-1452.
- Finnsementti, 2017. [WWW-lähde]. [Viitattu 25.10.2017]. <<http://www.finnsementti.fi/tietoa-betonista/tietoa-betonista-pienrakentajalle-ja-rautakauppiaalle/betonin-lujuus>>
- Gjørsv, O. E., 2009. *Durability design of concrete structures in severe environments*. Taylor & Francis, Lontoo. s. 220.
- Groves, G. W., 1981. Portland Cement Clinker Viewed by TEM. *J. Mater. Sci.* 16. s. 1063–1070.
- Kuosa, H., Vesikari, E., 2000. Betonin pakkasenkestävyyden varmistaminen, Osa 1. Perusteet ja käyttöikämitoitus. *VTT tiedotteita* 2056, Espoo. s. 141.
- Lahdensivu, J., 2012. Durability properties and actual deterioration of Finnish concrete facades and balconies. *Publication* 1028. Tampere University of Technology, Tampere. s. 117.
- Lahdensivu, J., et al., 2015. Betonielementtien uudelleenkäyttömahdollisuudet. *Tutkimusraportti* 162. Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere. s. 78.
- Liikennevirasto, 2010. Siltojen erikoistarkastusten laatuvaatimukset. Suunnittelu- ja toteuttamisvaiheen ohjaus. [Verkkajulkaisu]. *Liikenneviraston ohjeita* 1/2010 – 31.3.2010. [Viitattu 19.12.2017]. <[https://julkaisut.liikennevirasto.fi/sillat/julkaisut/et\\_laatuvaatimukset\\_2010.pdf](https://julkaisut.liikennevirasto.fi/sillat/julkaisut/et_laatuvaatimukset_2010.pdf)> ISSN 1798-6648

- Liikennevirasto, 2016. Liikenneväylien korjausvelkaohjelma 2016-2018, maantiet. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 14.12.2017]. <[https://www.liikennevirasto.fi/documents/20473/182908/korjausvelkakohteet\\_maantie/ff17fba6-d4be-4830-b230-422ae9ccf539](https://www.liikennevirasto.fi/documents/20473/182908/korjausvelkakohteet_maantie/ff17fba6-d4be-4830-b230-422ae9ccf539)>
- Liikennevirasto, 2017a. Liikenneviraston sillat 1.1.2017. Tekniikka ja ympäristö –osasto. [Verkkajulkaisu]. Liikenneviraston tilastoja 8/2017. [Viitattu 14.12.2017] <[https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf8/lti\\_201708\\_liikenneviraston\\_sillat\\_web.pdf](https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf8/lti_201708_liikenneviraston_sillat_web.pdf)> ISSN 1798-8128
- Liikennevirasto, 2017b. Tieverkon kunnossapito. Päivitetty 6.10.2017. [WWW-lähde]. [Viitattu 14.12.2017]. <http://www.liikennevirasto.fi/tieverkko/kunnossapito#.WdpE90xDwy4>
- Mehta, P.K., 2001. Concrete: Microstructure, Properties and Materials, Second edition. University of California. s. 239.
- Neville, A., 1995. Properties of concrete. Longman Group, Essex. s. 844.
- Page, C. L., 1988. Basic Principles of Corrosion. Schiessl, P (toim.). Corrosion of Steel in Concrete, Chapman and Hall, Lontoo. s. 3-21.
- Parrott, L. J., 1987. Review of carbonation in reinforced concrete. Cement and Concrete Association, Wexham Springs. s. 42.
- Pentti, M, Mattila, JS, Wahlman, J., 1998. Betonijulkisivujen ja parvekkeiden korjaus. Osa I. Rakenteet, vauriot ja kunnan tutkiminen. Talonrakennustekniikka, Julkaisu, no. 87, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Tampere. s. 156.
- Pigeon, M., Pleau, R., 1995. Durability of concrete in cold climates. Spon, Lontoo. s. 256.
- Poole, A. B., Sims, I., 2016. Concrete petrography: A handbook of investigative techniques, Second edition. CRC, Boca Raton. s. 794.
- Powers, T. C., 1949. The air requirement of frost-resistant concrete. Research and Development laboratories, Development Department Chicago. Bulletin 33. Portland Cement Association, Chicago. s. 28.
- Powers, T. C., Helmuth, R. A., 1953. Theory of volume changes in hardened Portland cement pastes during freezing. Research and Development Laboratories of the Portland Cement Association, Chicago. s. 285-295.
- Pratt, P., Ghose, A., Skalny, J., & Hewlett, P., 1983. Electron Microscope Studies of Portland Cement Microstructures during Setting and Hardening. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, vol. 310(1511). s. 93-103.
- Punkki, J., Suominen, V., 1994. Alkali reactivity of aggregate in Norway – and in Finland?. Betoni 2/1994. Suomen Betonitieto Oy, Helsinki. s. 30-32.
- Pyy, H., Holt, E., 2010. Onko Suomessa alkalikiviainesongelmaa?, Betoni 4/2010. Suomen Betonitieto Oy, Helsinki. s. 46-48.
- Pyy, H., Holt, E., Ferreira, M., 2012. Esitutkimus alkalikiviainesreaktiosta ja sen esiintymisestä Suomessa. VTT, Espoo. s. 27.

- Viirola, H., Raivio, P., 2000. Portlandsementin hydrataatio. VTT tiedotteita 2041. VTT Rakennustekniikka, Espoo. s. 64.
- Rakentaja.fi, 2012. Betonin valinta. [WWW-dokumentti]. [Viitattu 10.10.2017]. <[https://www.rakentaja.fi/artikkelit/9026/betonin\\_valinta.htm](https://www.rakentaja.fi/artikkelit/9026/betonin_valinta.htm)>
- ROTI, 2017. Rakennetun omaisuuden tila 2017. [Verkojulkaisu]. [Viitattu 10.12.2017]. <<https://www.ornamo.fi/app/uploads/2017/03/ROTI2017.pdf>>
- Schriener, K. L., 1989. The Microstructure of Concrete. In: Skalny, J.P. Materials Science of Concrete. American Ceramic Society, Westerville. s. 127–161.
- Sulankivi, H., 1993. Tiililaatan vaikutus betonin karbonatisoitumiseen. Talonrakennustekniikka. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Tampere. s. 134.
- Suomen Betoniyhdistys r.y., 2002. Betonijulkisivujen kuntotutkimus. Gummerus Kirjapaino OY, Helsinki. s. 178.
- Suomen Betoniyhdistys r.y., 2004. Betonitekniikan oppikirja 2004. Suomen betoniyhdistys r.y., Helsinki. s. 570.
- Suomen Betoniyhdistys r.y., 2013. Betonijulkisivujen kuntotutkimus 2013. Multiprint OY, Vantaa. s. 160.
- Suomen betoniyhdistys r.y., 2014. Tilaajan ohje 2014. [Verkojulkaisu]. Betonijulkisivun ja parvekkeiden kuntotutkimus. [Viitattu 16.12.2017]. <<http://www.betoniyhdistys.fi/media/julkaisut/betonijulkisivun-kuntotutkimus-tilaajan-ohje.pdf>>
- Suomen betoniyhdistys r.y., 2016. Betoninormit 2016. Suomen betoniyhdistys r.y., Helsinki. s. 164.
- Suomen betoniyhdistys r.y., 2018. Betonitekniikan oppikirja 2018. Suomen betoniyhdistys r.y., Helsinki. s. 570.
- Taylor, H. F. W., 1997. Cement Chemistry. 2. painos. Thomas Telford Publishing, Lontoo. s. 459.
- Taylor, P. C., Nagi, M. A., Whiting, D. A., 1999. Threshold chloride content for corrosion of steel in concrete: A literature review. Portland Cement Association, PCA R& D Serial No. 2169. s. 32.
- Tiehallinto, 2006. Betonirakenneohjeet 2006. [Verkojulkaisu]. Tiehallinto, Asiantuntijapalvelut, Helsinki 2006. [Viitattu 10.12.2017]. <[https://julkaisut.liikennevirasto.fi/sillat/julkaisut/betonirakenneohjeet\\_2006.pdf](https://julkaisut.liikennevirasto.fi/sillat/julkaisut/betonirakenneohjeet_2006.pdf)> ISBN 951-803-580-6
- Tuutti, K. 1982. Corrosion of steel in concrete. Swedish Cement and Concrete Research Institute, Tukholma. s. 304.
- Vuorinen, P. 2012. Betonointi kylmissä olosuhteissa. Koskenvesa, A. (toim.). Rakentajain kalenteri 2012. Rakennustieto Oy, Hämeenlinna. s. 134-142.