



Valeryia Pulko

Ennen vuotta 1930 valmistettujen betonien ominaisuudet ja korjausmenetelmät

25.11.2019

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 25.11.2019

Valvoja: Professori PoP Jouni Punkki

Ohjaajat: TkT Esko Sistonen ja DI Aleksi Pöyhönen

Tekijä Valeryia Pulko

Työn nimi Ennen vuotta 1930 valmistettujen betonien ominaisuudet ja korjausmenetelmät

Koulutusohjelma Building Technology

Koodi ENG27

Työn valvoja Professori PoP Jouni Punkki

Työn ohjaaja(t) TkT Esko Sistonen ja DI Aleksi Pöyhönen

Päivämäärä 25.11.2019

Sivumäärä 96 + 21

Kieli suomi

Tiivistelmä

Ennen vuotta 1930 valmistetut betonirakenteet ovat haastavia korjauskohteita, koska historiallisten betonien ominaisuuksia ei tunneta hyvin Suomessa. Historialliset betonit poikkeavat huomattavasti mikrokoostumukseltaan ja ominaisuuksilta nykyajan betoneista. Betonien kehityssuuntia oli monia 1800-luvusta alkaen ja tästä johtuen betoneiden ominaisuudet vaihtelivat paljon. Lisäksi betonissa oli myös huomattavia paikallisia vaihteluita. Näistä syistä jokainen historiallinen betonirakenne tulee tutkia perusteellisesti ennen korjaustoimenpiteiden päätöstä.

Tässä diplomityössä selvitetään vuosina 1860–1930 valmistettujen betonien ominaisuuksia. Lisäksi perehdytään historiallisten betonien tutkimus- ja korjausmenetelmiin. Diplomityön tutkimus on toteutettu laajalla kirjallisuuskatsauksella sekä kahden casekohteen laboratoriotutkimustulosten analysoinnilla. Case-kohteet ovat Säätytalon suihkulähde ja Kansallisarkiston balusterikaide.

Tutkimustulosten perustella merkittävin ero moderneissa ja historiallisissa betoneissa on sideaine. 1800-luvulla ja 1900-luvun alussa betonien valmistuksessa käytettiin monia erilaisia sideaineita, jotka olivat pääosin beliittipitoisia. Tästä johtuen historiallisten betonien lujuudenkehitys oli paljon hitaampaa ja lopullinen lujuus ei saavuttanut vastaava tasoa kuin moderni betoni. Historiallisten sideaineiden mikrorakenteen lisäksi historiallisten betonien ominaisuuksia heikensivät sideaineiden suuri raekoko, betonien puutteellinen suhteitus, sekä sekoitus ja tiivistys. Tämän lisäksi betonien osa-aineiden huono laatu on voinut heikentää historiallisten betonien ominaisuuksia.

Diplomityössä annetaan suositus ennen vuotta 1930 valmistettujen betonirakenteiden kuntoselvityksen suorittamiseksi. Suosituksessa on korostettu kattavan taustatiedon tärkeyttä ja tarkan silmämääräisen kuntoselvityksen merkitystä korjauskohteen kunnostuksessa. Historiallisia betoneita suositellaan tutkimaan ensisijaisesti ohuthieanalyysillä, koska tällä hetkellä ohuthieanalyysi on tehokkain ja yleisin tutkimusmenetelmä betonien mikrorakenteen tutkimiseen. Ohuthieanalyysin tutkimusmenetelmiä on kuitenkin suositeltavaa kehittää niin, että ne soveltuisivat tehokkaammin historiallisten betonien tutkimiseen.

Diplomityön yhteydessä laadittiin myös ennen vuotta 1930 valmistettujen betonirakenteiden korjaussuunnitelman valinnan suositus. Suosituksen tarkoitus on helpottaa korjausmenetelmien ja korjausbetonin valintaa.

Avainsanat historiallinen betoni, korjausrakentaminen, restaurointi, betonin tutkimusmenetelmät, ohuthie



Author Valeryia Pulko

Title of thesis Properties and repair methods of concrete manufactured before 1930 century

Degree programme Building Technology

Code ENG27

Thesis supervisor Professor Jouni Punkki

Thesis advisor(s) DSc Esko Sistonen ja MSc Aleksi Pöyhönen

Date 25.11.2019

Number of pages 96 + 21

Language Finnish

Abstract

Before nineteen thirty century constructed concrete structures in Finland are typically very challenging preparation projects because the properties of historic concretes are not well known in Finland. Historic concretes differ significantly from the modern concretes especially regarding to the micro-structure and mechanical properties. There were different alternatives in the development and for that reason the properties of cement and concrete varied depending on the location. Also the knowledge was based on the professionalism and experience rather than standards or written documents. For all these reasons and historic concretes may have very different properties. Therefore, in case of historic concrete structures, the concrete must be investigated carefully before starting the reparation work.

This master's thesis handles the properties of 1860-1920 century concretes. Additionally the investigation and preparation methods are covered. The thesis includes literature part and two laboratory research cases. The handled cases are the fountain of House of the Estates and the railing of National Archives of Finland.

The most significant difference between modern and historic concrete is the binder. Between the mid-1800 and 1900s several different kinds of binders were used. Many historic binder contain high concentrations of belite (C_2S). In case of high concentration of the belite, the strength development was slower and also the final strength were lower in compared to modern cements with high alite (C_3S) content. In addition to the different clinker composition, historic binders were coarser and the concrete proportioning, mixing, and curing were more defective than nowadays.

As a conclusion a procedure for preparation research is introduced. The conclusion highlights the importance of the visual inspection and test sampling locations. The primer recommendation for research is petrographic thin section method. Nowadays petrographic thin section appears to be the most efficient method for investigating the properties of historic concrete. Research methods for the binder type and age assessment of historic concrete should be further developed. Additionally the procedure for preparation plan selection was introduced in the thesis.

Keywords historic concrete, conservation, renovation, concrete investigation methods, petrographic thin section

Alkusanat

Olen yliopisto-opintojeni aikana ollut jo pitkään kiinnostunut korjausrakentamisesta. Erityistä kiinnostusta on herättänyt historiallisten arvokohteiden restaurointi. Aktiivisen etsinnöiden jälkeen sain erikoisen ja kiinnostavan diplomityöaiheen, johon tartuin heti innolla. Aihe käsittelee historiallisten betonien ominaisuuksia ja tutkimus- sekä korjausmenetelmiä. Diplomityö on ollut raskas oppimisprosessi, joka on edennyt monien haasteiden kautta kohti johtopäätöksiä. Toivon, että diplomityön tutkimustulokset antavat hyödyllistä tietoa kaikille historiallisten betonirakenteiden kanssa työskenteleville henkilöille.

Työn valmistuttua, olen kiitollinen monille tahoille ja henkilölle. Haluan kiittää Senaatti-kiinteistöjä ja Pöyry Finland Oy:tä mahdollisuudesta toteuttaa opinnäytetyö äärimmäisen mielenkiintoisesta ja haastavasta aiheesta. Olen kiitollinen työn valvojana ja tarkastajana toimineelle professori Jouni Punkkille ja ohjaajille Esko Sistonen (Aalto-yliopisto) ja Aleksi Pöyhönen (Pöyry Finland Oy).

Osoitan kiitokseni myös Senaatti-kiinteistöjen yhteyshenkilölle Selja Flinkille erittäin tehokkaasta ja sujuvasta yhteistyöstä ja avusta ruotsinkielisten lähdekirjallisuuksien kanssa. Kiitän myös tutkimuskeskuksen Eurofins Expert Services asiantuntijoita Pertti Koskista ja Jarkko Klamia diplomityön case-kohteiden betoninäytteiden tutkimuksista ja valmiudesta vastata kaikkiin minun kysymyksiin. Lisäksi haluan kiittää kaikkia korjausalan asiantuntijoita, jotka ovat auttaneet minua erityisesti kirjallisuusaineiston keruussa.

Lopuksi haluan vielä esittää lämpimät kiitokset perheelleni sekä ystävilleni tuesta ja kannustuksesta koko opintojeni aikana. Erityiskiitokset haluan osoittaa Laurille ymmärtämisestä ja jaksamisesta diplomityöni aikana.

Espoo 25.11.2019

Valeryia Pulko

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Alkusanat

Sisällysluettelo	1
Termit	3
1 Johdanto	4
1.1 Työn tausta	4
1.2 Tutkimusongelma ja työn tavoitteet	5
1.3 Työn rakenne ja tutkimuksen rajaukset	5
2 Betoniteknologian ja -rakentamisen kehityksen historia	6
2.1 Betonikehityksen historia ennen 1840-lukua	6
2.2 Betonikehityksen historia vuosina 1840–1930	7
2.3 Sementtiteollisuus Suomessa	11
2.4 Betonirakennusteollisuus Suomessa	13
2.5 Betonirakentaminen Suomessa	14
2.6 Betonirakentamisen opetus ja kirjallisuus Suomessa	18
3 Historiallisten betonien valmistustekniikka	20
3.1 Historialliset sideaineet	20
3.1.1 Historiallisten sideaineiden lajittelu	20
3.1.2 Historiallisten sementtien valmistus	22
3.2 Kiviaines	24
3.3 Lisäaineet	25
3.4 Seossuhteet	26
3.5 Vesi-sideainesuhde	27
3.6 Vesi	28
3.7 Koriste-elementtien valmistustekniikka	29
4 Historiallisten betonien mikrorakenne ja -koostumus	32
4.1 Sideaineiden mineraloginen koostumus	32
4.2 Betonien hydrataatioreaktiot	37
4.3 Sideaineiden klinkkerirakeiden raekoot	39
4.4 Kiviaineksen rakeisuusjakauma	40
4.5 Historiallisten betonin huokossysteemi	43
4.6 Historiallisten betonien karbonatisoituminen	46
5 Historiallisten betonien tutkimusmenetelmät	48
5.1 Korjauskohteen yleiset tutkimusmenetelmät	48
5.2 Betonin mikrorakenteen ja -koostumuksen tutkiminen	49
5.2.1 Optiset menetelmät	49
5.2.2 Kemiaalliset menetelmät	51
5.2.3 Röntgensäteilyyn pohjautuvat menetelmät	52
5.2.4 Termoanalyttiset menetelmät	52
5.3 Betonin lujuuden tutkiminen	53
5.3.1 Puristuslujuuden määrittämisen suorat menetelmät	53
5.3.2 Vetolujuuden määrittämisen suorat menetelmät	53
5.3.3 Veto- ja puristuslujuuden määrittämisen epäsuorat menetelmät	54
5.4 Betonin pakkasenkestävyyden tutkiminen	55
5.4.1 Suorat menetelmät	55
5.4.2 Epäsuorat menetelmät	56

6	Kokeellinen osio	57
6.1	Historiallisten betonien tutkimusmenetelmien kartoitus	57
6.2	Case-kohteiden tutkimusmenetelmät	58
6.3	Case-kohde I: Säätytalon suihkulähde	59
6.3.1	Historia.....	59
6.3.2	Näytteenotto	61
6.3.3	Tutkimustulosten analyysi	61
6.3.4	Vertailu aikaisempaan tutkimukseen	66
6.3.5	Tutkimustulosten yhteenveto	69
6.4	Case-kohde II: Kansallisarkiston balusterikaide	70
6.4.1	Historia.....	70
6.4.2	Näytteenotto	71
6.4.3	Tutkimustulosten analyysi	71
6.4.4	Vertailu aikaisempiin tutkimuksiin	75
6.4.5	Tutkimustulosten yhteenveto	77
6.5	Kokeellisen osion tavoitteiden saavuttaminen	78
7	Soveltava osio	80
7.1	Suositus historiallisten betonirakenteiden tutkimusmenetelmien valintaan	80
7.2	Suositus historiallisten betonirakenteiden korjaussuunnitelman valintaan.....	82
7.2.1	Yleinen suositus korjaussuunnitelman valintaan	82
7.2.2	Case-kohteiden korjaussuunnitelmien ehdotus	84
8	Johtopäätökset.....	86
8.1	Yhteenveto	86
8.2	Tavoitteiden saavuttaminen.....	88
8.3	Jatkotutkimusmahdollisuudet.....	88
	Lähdeluettelo	90
	Liiteluettelo	96
	Liitteet	

Termit

Aliitti (trikalsiumsilikaatti, C_3S) on hydraulisen sideaineen klinkkerin komponentti, joka muodostuu sideaineen raaka-aineiden poltossa lämpötilalla 1260 -1450 °C. Aliitti on modernien sementtien päämineraali.

Balusteri on pieni, koristeellinen ja yleensä profiililta pisaranmuotoinen kaiteen pylväs.

Beliitti (dikalsiumsilikaatti, C_2S) on hydraulisen sideaineen klinkkerin komponentti, joka muodostuu sideaineen raaka-aineiden poltossa lämpötilalla 700 -1200 °C. Beliitti on hydraulisen kalkin ja historiallisten sementtien päämineraali.

Betoni on sideaineesta, kiviaineksesta, vedestä ja mahdollisista lisäaineista valmistettu rakennusmateriaaliksi, joka pakotetaan haluttuun muotoon valamalla esimerkiksi muotiin.

Historiallinen betoni on tämän tutkimuksen rajauksen mukaan ennen vuotta 1930 valmistettu betoni.

Hydraulinen kalkki on hydraulinen sideaine, jota valmistettiin kalkkikiven ja saven (alle 25 p- %) sekoituksesta polttamalla seosta uunissa 900 – 1200 °C lämpötilassa.

Laasti on sideaineesta, kiviaineksesta, vedestä ja mahdollisista lisäaineista valmistetuksi rakennusmateriaaliksi, jota käytetään rakennusosien muuraamiseen ja julkisivujen rappautamiseen.

Luonnollinen hydraulinen kalkki on hydraulinen sideaine, jota valmistettiin savipitoisesta (alle 25 p- %) kalkkikivestä polttamalla seosta uunissa 900 – 1200 °C lämpötilassa.

Luonnonsementti on hydraulinen sideaine, jota valmistettiin savipitoisesta (yli 25 p- %) kalkkikivestä polttamalla seosta uunissa 900 – 1300 °C lämpötilassa.

Moderni betoni on tämän tutkimuksen rajauksen mukaan vuoden 1930 jälkeen valmistettu betoni.

Portlandsementti tai historiallinen portlandsementti on hydraulinen sideaine, jota valmistettiin kalkkikiven, saven ja mahdollisten lisäaineiden (kuten esim. kipsi) sekoituksesta polttamalla seosta uunissa 1300 – 1450 °C lämpötilassa.

Romanisementti on luonnonsementti, jota valmistettiin merkelikivestä.

Varhainen keinotekoinen sementti on hydraulinen sideaine, jota valmistettiin kalkkikiven, saven ja mahdollisten lisäaineiden (kuten esim. kipsi) sekoituksesta polttamalla seosta uunissa 900 – 1300 °C lämpötilassa.

1 Johdanto

1.1 Työn tausta

Tässä diplomityössä käsitellään ennen vuotta 1930 valmistettujen betonien ominaisuuksia sekä tutkimus- ja korjausmenetelmiä. Tutkimuksen tilasivat Senaatti-kiinteistöt syksyllä 2018. Toisena hankkeen osapuolena toimi konsulttitoimisto Pöyry Finland Oy.

Ennen vuotta 1930 valmistettujen betonirakenteiden korjausmateriaalien valinta on haastavaa, koska historiallisten betonien ominaisuuksia ei tunnetta riittävän hyvin Suomessa. Säilynyt kirjallinen tieto on myös suppeaa, sillä historiallisten kohteiden rakennusvaiheen dokumentointi oli harvinaista ja rakentaminen perustui yleensä perimätietoon. Monilla ennen vuotta 1930 rakennetuilla suomalaisilla betonirakennuksilla ja -rakenteilla on korjaustarve. Tämän takia sopivien korjausbetonien kehittäminen on ajankohtainen ongelma, joka vaatii asianmukaista perehtymistä historiallisten betonien ominaisuuksiin.

Ensimmäiset betonirakenteet Suomessa valmistettiin 1850-luvun alussa. Saimaan kanavan muurirakenteet valmistuivat vuonna 1856. Tämän jälkeen betonia käytettiin sekä kantavien rakenteiden että koriste-elementtien materiaalina. Betonin valmistusteknologia ja betonirakentamisen työmenetelmät kehittyivät 1800–1900-lukujen vaihteessa. Jatkuvan kehityksen myötä 1800-luvun lopun ja 1900-luvun alun betonien laatu vaihteli paljon. Betonien laatu oli riippuvainen sekä osa-aineiden saattavuudesta että työmaan osaamis- ja varustetasosta. Vuonna 1929 laadittiin valtion ja kunnan töitä käsitteleviä Betoni- ja rautabetonirakenteiden määräyksiä, joiden myötä betonien laadunvarmistus kehittyi.

Monet ennen vuotta 1930 rakennetut betonirakenteet ovat nykyään suojeltuja kohteita. Rakennuksia suojellaan esimerkiksi rakennusperintölailla (498/2010), kirkkolailla (1054/1993) tai lailla ortodoksisesta kirkosta (985/2006). Suojelulait ohjaavat käyttämään korjauksissa ensisijaisesti alkuperäisiä työmenetelmiä, työtapoja ja materiaaleja. Ohjeistuksia on noudattava myös silloin, kun alkuperäiset työmenetelmät, työtavat ja materiaalit eivät täytä kaikkien nykynormien ohjeistusta. Tapauksissa, joissa alkuperäisien materiaalien käyttö on mahdotonta, korjausmateriaalit on valittava niin, että ne sopeutuvat harmonisesti alkuperäisten materiaalien kanssa.¹

Lisäksi aikaisemmat betonirakenteiden korjaukset osoittavat, että alkuperäistä materiaalia mukailevalla korjausbetoneilla saavutetaan kestävä korjaustulos, joka visuaalisesti ei erotu paljon alkuperäisistä betoniosista. Sen sijaan modernien korjausbetonien käyttö historiallisissa korjauskohteissa voi lyhentää korjauksen käyttöikää. Pahimmissa tapauksissa väärin valittu korjausbetoni voi aiheuttaa alkuperäisten rakennneosien vaurioitumisen.

Suomessa historiallisten betonien ominaisuuksia ja niiden eroja moderneihin betoneihin ei ole tutkittu riittävästi. Vuonna 2004 FT Thorborg von Konow teki Suomenlinnan historiallisten betonien tutkimuksen, jossa asia käsiteltiin Suomenlinnan näkökulmasta melko laajasti. Tutkimuksen tuloksia ei voida kuitenkaan yleistää kaikille sen ajan rakenteille, koska historiallisten betonien koostumuksessa ja valmistuksessa oli paljon vaihtelua työmaasta riippuen. Suomen tilanteesta poiketen historiallisten betonien ominaisuuksiin on perehdytty Euroopassa laajemmin. Tutkimuksia on suoritettu mm. Belgiassa, Italiassa ja Iso-Britanniassa.

¹ Mattinen 1997

1.2 Tutkimusongelma ja työn tavoitteet

Ennen vuotta 1930 valmistetut betonirakenteet ovat haastavia korjauskohteita, koska historiallisten betonien ominaisuuksia ei tunneta riittävän hyvin. Tämä johtuu siitä, että historialliset betonit poikkeavat huomattavasti koostumukseltaan ja ominaisuuksiltaan nykyajan betoneista, eivätkä aikaisemmat tutkimukset anna riittävästi pohjatietoja sopivien korjausmenetelmien ja -materiaalien valintaan.

Tässä diplomityössä on kolme tavoitetta:

1. Selvittää vuosina 1860–1930 valmistettujen betonien ominaisuuksia
2. Selvittää millä tutkimusmenetelmillä voidaan tutkia tehokkaasti historiallisia betoneja.
3. Antaa suosituksia korjausmenetelmän ja -betonin valintaan kerätyn tutkimustulosten pohjalta.

1.3 Työn rakenne ja tutkimuksen rajaukset

Tämä diplomityö koostuu kirjallisuuskatsauksesta, kokeellisesta ja soveltavasta osiosta. Kirjallisuuskatsauksessa tarkastellaan betoniteknologian ja -rakentamisen kehitystä. Kirjallisuuskatsauksessa tarkastellaan aiheesta tehtyjen tutkimusten lisäksi ennen vuotta 1930 julkaistuja betonirakentamiskirjallisuutta ja betoninormeja. Historiallisten betonien kehitystä tarkastellaan myös mikrorakenteen tasolla, koska se antaa parhaan käsityksen historiallisten betonien ominaisuuksista. Lisäksi kartoitetaan historiallisten betonirakenteiden kuntotutkimuksessa yleisesti käytettyjä tutkimusmenetelmiä.

Kokeellisessa osiossa tutkitaan historiallisten betonien ominaisuuksia kahden case-kohteen avulla, jotka ovat Säätytalon suihkulähde (n. 1891) ja Kansallisarkiston betonibalusterikaide (1890). Lisäksi kokeellisen tutkimuksen pohjalta tutkitaan tutkimusmenetelmien soveltuvuutta historiallisten betonien tutkimiseen. Case-kohteiden tutkimukset suorittivat tutkimuskeskuksen Eurofins Expert Services Oy asiantuntijat.

Soveltavassa osiossa tutkimustuloksen ja kirjallisuuskatsauksen pohjalta laaditaan suosituksia historiallisten betonirakenteiden sekä tutkimusmenetelmien että korjausmenetelmien valintaan. Lisäksi historiallisten betonirakenteiden korjausmenetelmien valinnan suosituksen nojalla tehdään case-kohteiden korjausmenetelmien ehdotuksia.

Diplomityön laajuus rajataan ennen vuotta 1930 Suomessa valmistettujen betonien ominaisuuksiin. Kyseinen työ keskittyy vain betonien ominaisuuksiin. Tässä tutkimuksessa *betoni* on määritetty sideaineesta, kiviaineksesta, vedestä ja mahdollisista lisäaineista valmistetuksi rakennusmateriaaliksi, joka pakotetaan haluttuun muotoon valamalla esimerkiksi muotiin. Tutkimuksessa termi *laasti* on määritetty sideaineesta, kiviaineksesta, vedestä ja mahdollisista lisäaineista valmistetuksi rakennusmateriaaliksi, jota käytetään rakennusosien muuraamiseen ja julkisivujen rappaamiseen. Diplomityössä ei käytetä termien *betoni* ja *laasti* toista yleistä määrittelyperiaatetta kiviainesjakauman perusteella.

2 Betoniteknologian ja -rakentamisen kehityksen historia

Tässä luvussa käsitellään betoniteknologian ja -rakentamisen kehityksen historia sekä maailmalla että Suomessa. Betonin valmistus aloitettiin arviolta noin vuonna 150 eKr. Vasta 1800-luvulta lähtien betoniteknologia alkoi kehittyä modernin betoniteknologian suuntaan. Kehitysten seurauksena betonin käyttö rakennusmateriaalina yleistyi vuoteen 1930 asti. Luvun tärkein sisältö on koottu liitteen 1 aikajanaan.

2.1 Betonikehityksen historia ennen 1840-lukua

Hydraulisten sideaineiden käytöstä on todisteita noin vuodelta 1000 eKr. Foinikiassa. Laajemmin muurauslastia sideaineena alkoivat käyttää löytöjen perustella kreikkalaiset noin vuonna 750 eKr. Tästä huolimatta vasta antiikin Roomassa noin vuonna 150 eKr. alettiin käyttää hydraulisia sideaineita betonin valmistukseen. Roomalaista keinotekoista kiveä valmistettiin kalkista ja potsolaani nimisestä tuliperäisestä hiekasta.² Yksi kuuluisimmista betonirakenteista antiikin ajalla oli akvedukti Kölnin ja Eiffelin välillä. Säilyneiden akveduktin betonirakenteiden perusteella tiedetään, että betonin sideaineena ei käytetty potso- laania vaan ainoastaan savipitoisesta kalkkikivestä valmistettua *hydraulista kalkkia*.³

Betonien kehitys oli säilyneen tiedon perusteella vähäistä keskiajalla, vasta 1600-luvulla alettiin tietoisesti jäljitellä Antiikin Rooman betonia. Betonin sideainetta valmistettiin Antiikin Rooman tapaan potsolaanista ja kalkkista. Seosta käytettiin mm. vuonna 1669 Tangerin sataman rakenteissa.⁴ Vuonna 1756 englantilainen insinööri John Smeaton tutki uutta sideainetta seosta. Hän suoritti kokeita erilaatuisille kalkkivilaasteille löytääkseen korjauslaastia Eddystonin majakan rekonstruktioon. Tutkimuksilla Smeaton osoitti, että savipitoisista kalkkivilaaduista valmistetuilla laasteilla on hydraulisia ominaisuuksia.⁵

Vuonna 1796 englantilainen tehtailija James Parker valmisti sideainetta kalkkikivestä, jonka savipitoisuus oli noin 25 %⁶. Uuden seoksen punertavan värin vuoksi, joka muistutti Antiikin Rooman sementtiä, Parkerin sideaine sai nimensä *romanisementti* (eng. *Roman cement*)⁷. Vuonna 1911 julkaistussa kirjassa Rautabetoni⁸ Parkerin sementistä käytetään nimeä *romaanisementti*. Romanisementistä on rakennettu mm. vuonna 1828 tunneli Thamesjoen ali Lontoossa. Romanisementti oli laajasti käytössä Euroopassa 1900-luvun alkuun asti.⁹

1800-luvun alussa ranskalainen insinööri Luis Vicat tutki perusteellisesti kalkin kykyä kovettua veden alla¹⁰. Vuonna 1812 hän pystyi valmistamaan kalkkikiven ja saven seoksesta ensimmäistä keinotekoista sideainetta ja nimesi sen *hydrauliseksi kalkiksi* (eng. *hydraulic lime*). Vuonna 1822 englantilainen tehtailija James Frost patentoi oman versionsa Vicatin sideaineesta nimellä *brittiläinen sementti* (eng. *British cement*).¹¹

² Nykänen 1951, 3–4

³ Kaila 2000, 167

⁴ Kaila 2000, 169

⁵ Nykänen 1951, 5

⁶ Hughes, Swann & Gardner 2007, 25

⁷ Kaila 2000, 166

⁸ Nykänen 1911, 6

⁹ Kaila 2000, 171

¹⁰ Konow 2005, 4–5

¹¹ English Heritage 2012, 44

Nykymääritelmän mukaan aikaisemmin mainitut sideaineet eivät ole varsinaisia sementtejä. 1800-luvun ja betonin historian käsittelevissä kirjallisuuslähteissä on yleensä käytetty kuitenkin niiden kohdalla termiä *sementti*. Historialliset sideaineet on esitetty taulukossa 1. Varsinaisen sementin historia voidaan katsoa alkavan portlandsementin keksimisen jälkeen. Vasta vuonna 1824 englantilainen tehtailija Joseph Aspdin patentoi uuden seoksen nimellä *portlandsementti* (eng. *Portland cement*). Aspdinin portlandsementin seossuhde oli viisi osaa kalkkia ja kaksi osaa savea. Lisäksi sen polttolämpötila oli alle 1220 °C.¹²

Taulukko 1. Taulukossa on esitetty hydraulisen kalkin ja sementin kehitys. On otettava huomioon, että hydraulista kalkkia käytettiin ensin muurauslaastien sideaineena. Ensimmäiset todisteet sen käytöstä betonin sideaineena ovat peräisin Roomasta noin vuodelta 150 eKr. (Nykänen 1951, 9).

Aika	Keksijä tai ensimmäinen tunnettu käyttäjä	Valmistusmenetelmä	Laji
1000 e. Kr.	Foinikialaiset	Kalkki ja tiilijauhe	Hydraulinen kalkki
750 e. Kr.	Kreikkalaiset ja roomalaiset	Kalkki ja santorini	Hydraulinen kalkki
— e. Kr.	Roomalaiset	Kalkki ja puzzolani	Hydraulinen kalkki
— e. Kr.	Roomalaiset	Kalkki ja trassi	Hydraulinen kalkki
50 e. Kr.	Roomalaiset	Poltettu kovakalkki	Hydraulinen kalkki
55 j. Kr.	Roomalaiset	Poltettu savikalkkikivi	Romansementti
1200	Hollantilaiset	Kalkki ja trassi	Hydraulinen kalkki
1520	Biviagarcio	Poltettu piikalkki	Hydraulinen kalkki
1756	Smeaton	Poltettu savimerkeli	Hydraulinen kalkki
1796	Parker, Englanti	Poltettu kalkkimerkeli	"Romansementti"
1815	John, Saksa	Keinotekoinen raaka-aineseos	Keinotekoinen hydraulinen kalkki
1824	Aspdin, Englanti	Keinotekoinen raaka-aineseos	Keinotekoinen "portlandsementiksi" kutsuttu sementti
1844	Johnson, Englanti	Keinotekoinen raaka-aineseos + polttaminen sintraukseen	Portlandsementti
1892	Passow, Saksa	70 % portlandsementtiä + 30 % masuunikuonaa	Rautaportlandsem.
1892	Passow, Saksa	35 % portlandsementtiä + 65 % masuunikuonaa	Kuonasementti
1899	Ehemann, Saksa	Portlandsementti, jonka rautaoksidi-pitoisuus = 0, tai hyvin pieni	Valkosementti
1913	Bied, Ranska	Bauksitin ja kalkkikiven sulattaminen	Aluminaattisementti
1915	Spindel, Itävalta	Erikoinen kokoomus ja huolellinen polttaminen. Hienojauhatus.	Nopeasti kovettuva portlandsementti
1932	Forsén, Suomi (Ruotsi)	Kemiallisen kokoomuksen avulla sementti, joka lämmönkehitys pieni	Silikaattisementti

Vasta vuonna 1844 Aspdinin sementtiseosta kehitettiin modernin portlandsementin kaltaiseksi. Joseph Aspdinin sementtitehtaan työntekijä Isaac Johnson poltti seosta noin 1450 °C:ssa, jolloin tapahtuu sementin osa-ainesten sintraantumista.¹³ Sintrauksen seurauksena portlandsementin lujuus oli huomattavasti suurempi kuin aikaisemmin kehitettyjen seosten lujuus¹⁴.

2.2 Betonikehityksen historia vuosina 1840–1930

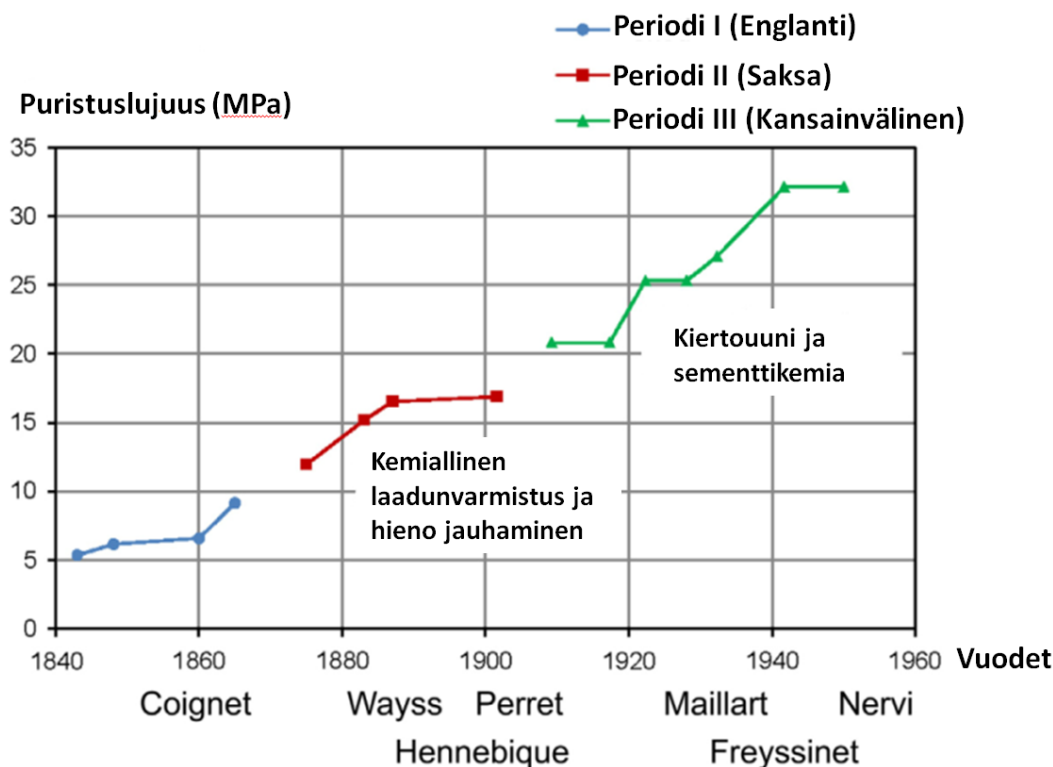
Vuosien 1840–1930 betoniteknologian kehityksen seurauksena betonin ominaisuudet parantuivat merkittävästi, joka vaikutti betonin yleistymiseen rakennusmateriaalina. Betonin ominaisuuksien parantamiseen vaikuttivat ensisijaisesti sementin polttoteknologian kehitys, betonin suhteituksen kehitys ja betonin valmistusmenetelmien kehitys.

¹² English Heritage 2012, 44

¹³ Hurme ym. 1991, 9

¹⁴ Kaila 2000, 171

Merkittävin syy betonin käytön yleistymiselle oli puristuslujuuden kasvu arvosta 5 MPa arvoon 25 MPa vuosina 1840–1930 (kuva 1). Lujuuden kehitys voidaan jakaa tällä aikavälillä kolmeen periodiin, jotka on esitetty alla olevassa kuvassa. Betonin puristuslujuus 1800-luvun puolivälissä oli alle 10 MPa, 1900-luvun alkupuolen betonin lujuus oli keskimäärin 15–20 MPa ja vuoteen 1930 mennessä betonin lujuus oli yli 25 MPa.¹⁵ Verrattuna moderneihin betoneihin, joiden lujuus on keskimäärin 30–60 MPa betonin lujuusluokasta riippuen, historialliset betonit olivat paljon heikompia lujuusominaisuuksiltaan.



Kuva 1. Vuosina 1840–1950 betoniteknologian kehitysten seurauksena betonin puristuslujuus kasvoi arvosta 5 MPa arvoon 32 MPa. Betonien lujuudet mitattiin 28 vuorokauden iässä ja betonien seossuhde oli yleisesti 1:3 (sideaine : kiviaines) (Hellebois ym. 2013, 150 suomennettu).

Alkuvaiheessa sementtiä valmistettiin perinteisissä kuilu-uuneissa, joita käytettiin jo vuosisatoja aikaisemmin poltetun kalkin valmistukseen¹⁶. Vuonna 1877 englantilainen insinööri Thomas Russell Crampton patentoi sementin valmistusmenetelmän, jossa raaka-aineiden polttamista suoritettiin kiertouuneissa. Cramptonin kiertouunin rakenteessa oli kuitenkin puutteita, joiden vuoksi polttomenetelmän hyötysuhde oli alhainen. Vasta vuonna 1898 amerikkalaiset insinöörit onnistuivat kehittämään brittiläisten ideoiden pohjalta kiertouunin rakennetta.¹⁷ Uusi valmistusmenetelmä mahdollisti sementin laadun parantamisen ja alensi kustannustasoa.¹⁸

Kiviaineksen rakeisuuden vaikutusta betonin lujuuteen alettiin tutkia 1800-luvun alussa. Ensimmäisenä tutkielman aiheesta julkaisi H. W. Wright vuonna 1845. Amerikkalaiset tutkijat W.B. Fuller ja S.C. Thompson kirjoittivat vuonna 1907 teoksen, jossa he osoittivat, että oikea kiviaineksen rakeisuusjakauma parantaa betonin ominaisuuksia.¹⁹

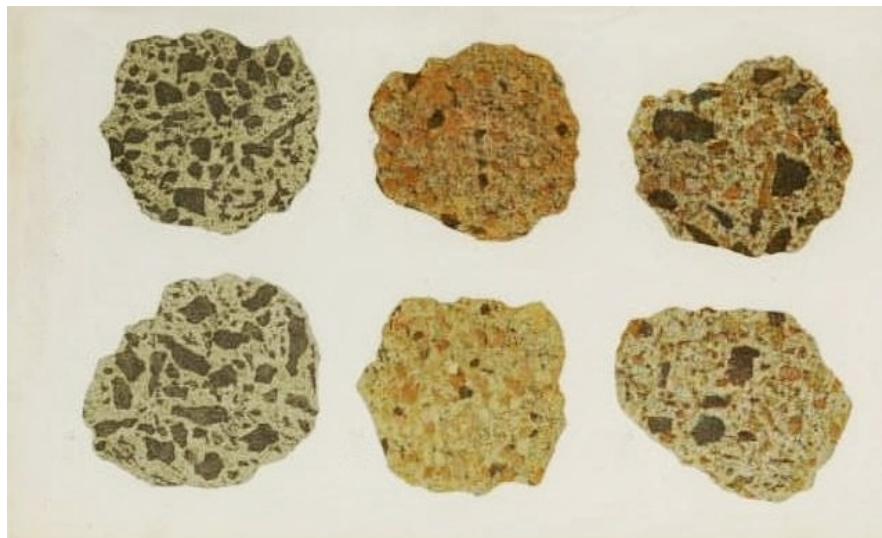
¹⁵ esim. Urquhart 2013, 15 ja Hellebois ym. 2013, 150

¹⁶ Kaila 2000, 170

¹⁷ Konow 2005, 6

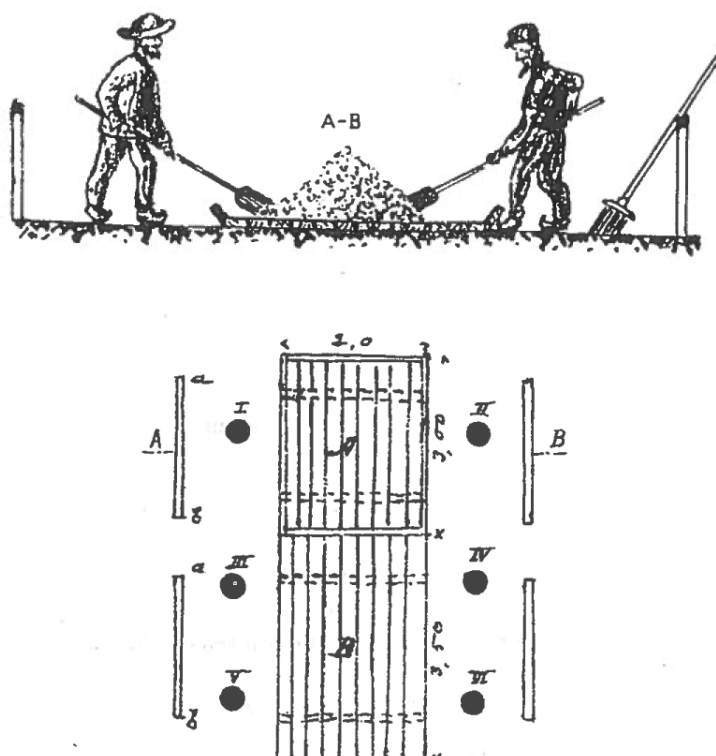
¹⁸ Finnsementti 2012

¹⁹ Nykänen 1951, 6



Kuva 2. 1800-luvun betonit olivat epähomogeenisiä ja ulkonäöltä erilaisia keskenään. (Reid 1979, 2).

Vuonna 1892 ranskalainen insinööri René Feret julkaisi ensimmäisenä teoksen vesimäärän vaikutuksesta betonin laatuun. Teos ei ollut laajasti tunnettu rakennusinsinöörien ja -mestareiden keskuudessa. Tästä syystä vesimäärän vaikutusta betonin ominaisuuksiin aliarvioitiin pitkään.²⁰ Vasta vuonna 1918 amerikkalainen betonin tutkija Duff A. Abrams mullisti rakennusalan teoksella *Design of Concrete Mixtures*, jossa hän osoitti betoniko-keiden tulosten avulla vesisementtisuhteen ja betonin puristuslujuuden välisen riippuvuuden²¹.

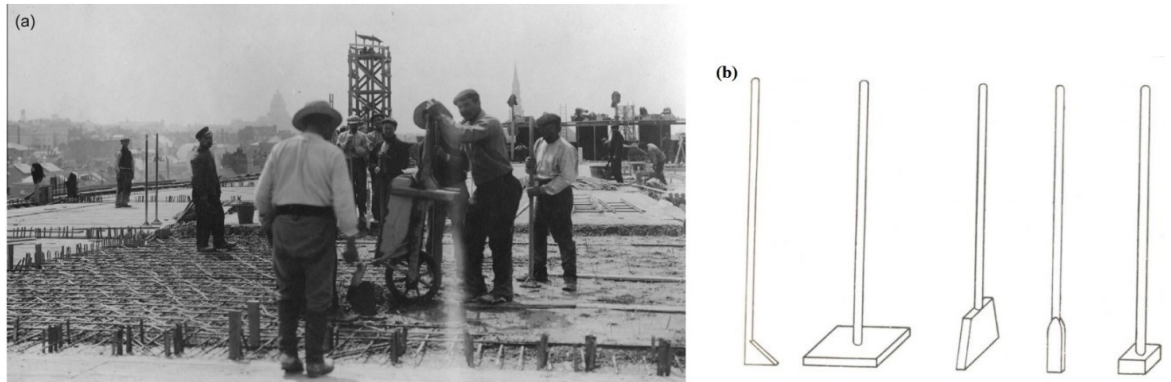


Kuva 3. 1800-luvun loppupuoleen kuvaohje betonin osa-aineiden sekoituksesta käsin. Lavalle laitettiin määrätty määrä hiekkaa tai soraa, jonka päälle laitettiin tasapaksu sementtikerros. Sekoitettiin 3-4 kertaa tasaisen seoksen saavuttamiseksi. Sekoitus tehtiin ilma keskeytyksiä. Kastelun jälkeen mullankosteaan seokseen sekoitettiin sepelikivet (Hurme ym. 1991, 12).

²⁰ Hellebois ym. 2013, 152

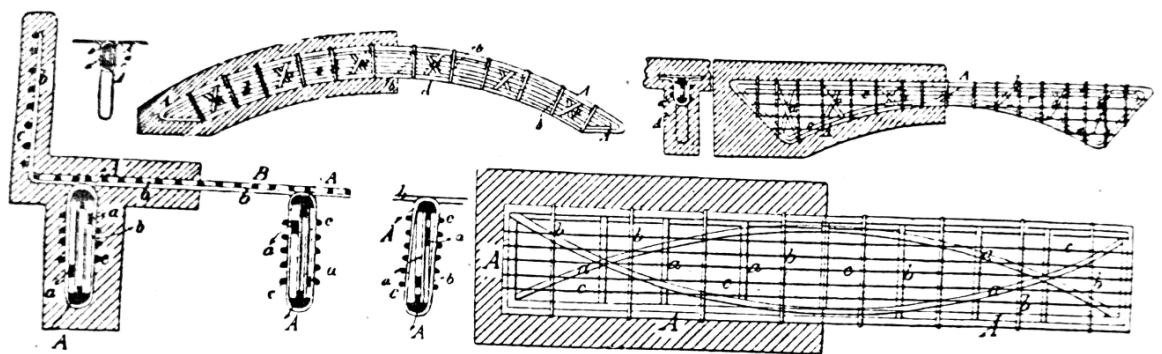
²¹ Hurme ym. 1991, 19

Betonin valmistuksessa alettiin käyttää sekoitus- ja tiivistyskoneita jo 1800-luvun loppupuolella, kuitenkin näiden koneiden laajempi käyttö alkoi vasta 1900-luvun alussa. Sekoitus- ja tiivistyskoneita käytettiin pääosin isoilla työmailla. Pienillä työmailla betonia sekoitettiin ja tiivistettiin käsin vielä 1900-luvun alussakin.²² Tämän seurauksena historiallisten betonien laatu vaihteli paljon työmaiden varustetasosta riippuen.



Kuva 4. Kuvassa (a) on esitetty vuoden 1909 työmaa, jossa betonia tiivistettiin käsin. Betonin tiivistämiseen käytettiin 10–15 kg painoisia, valurautaisia nuijia (Hellebois ym. 2013, 152). Kuvassa (b) on esitetty erikoiset tiivistysnuijat (Weyerstall 1913, 79).

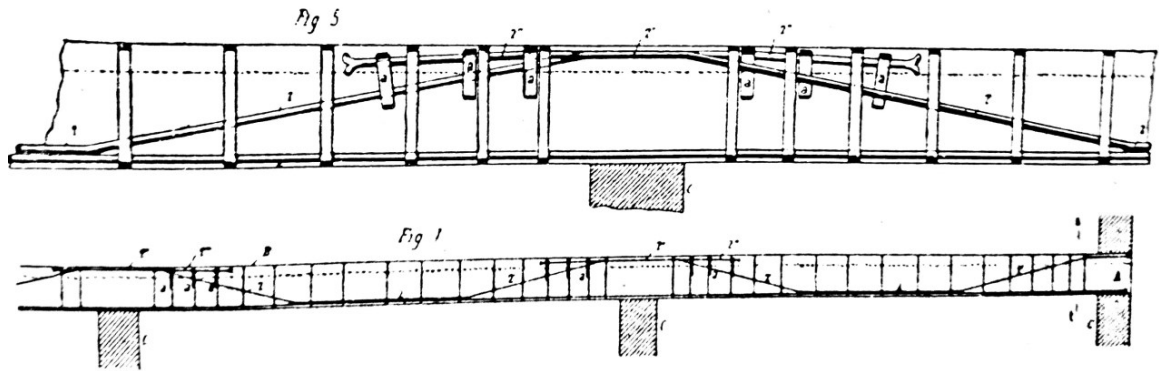
Betonin ominaisuuksien parantaminen ja erityisesti puristuslujuuden kasvaminen mahdollisti monimutkaisten betonirakenteiden valmistamisen. Betonin heikkojen vetolujuusominaisuuksien parantamiseksi 1800-luvun loppupuolella keksittiin lukuisia raudoitusjärjestelmiä. Raudoitusjärjestelmistä 1800-luvun loppupuolella laajinten käytettiin Monier-raudoitusjärjestelmää, jonka kehitti ja patentoi vuonna 1878 ranskalainen puutarhuri Joseph Monier. 1900-luvun alkupuolella käytetyin järjestelmä oli Hennebique-pilaripalkkijärjestelmä, jonka kehitti ja patentoi vuonna 1892 ranskalainen insinööri François Hennebique. Raudoitettujen betonirakenteiden kehityksen seurauksena betonin käyttö yleistyi 1900-luvun alussa.²³



Kuva 5. Kuvassa on esitetty Monier-raudoitusjärjestelmän periaatepiirustus vuoden 1878 patentista. Raudoitusjärjestelmä sai laajaa käyttöä sekä Euroopassa että Suomessa 1800-luvun loppupuolella (Nykänen 1951, 8).

²² Hellebois ym. 2013, 152

²³ esim. Kaila 2000, 177–180 tai Nykänen 1951, 7–8



Kuva 6. Kuvassa on esitetty osaa Hennebique-pilaripalkkijärjestelmän periaatepiirustusta ensimmäisestä patentista Ruotsissa. Hennebique sai patentin järjestelmälle vuonna 1892. Rauditusjärjestelmä oli laajassa käytössä sekä Euroopassa että Suomessaakin 1900-luvun alkupuolella (Nykänen 1951, 8)

Betonirakenteiden yleistymisestä johtuen 1800–1900-lukujen vaihteessa alettiin seurata betonien laatua betonirakenteiden turvallisuusriskien vähentämiseksi. Ensimmäistä kertaa systemaattista betonikoekappaleiden puristus- ja vetolujuuden mittaamista käytettiin Saksassa²⁴. Maailman ensimmäiset betoninormit julkistettiin vuonna 1877 Preussissa²⁵. Siitä huolimatta muualla Euroopassa normit laadittiin huomattavasti myöhemmin.

Vuonna 1904 julkaistiin Britannian ensimmäinen betonistandardi²⁶. Rauditusjärjestelmien kehityksestä huolimatta Ranskassa betoninormit tulivat voimaan vuonna 1906. Toukokuussa 1903 Venäjällä lopetettiin erilaisten rauditusjärjestelmien patentointi maan sisällä ja rauditusjärjestelmien käyttö vapautettiin. Vuonna 1908 ensimmäiset betoninormit julkaistiin Venäjällä.²⁷

Suomessa betoniklubi laati, rakennustarkastuskonttorin toimeksiannosta, *Helsingin kaupungin määräykset betoni- ja rautabetonirakenteista* vuonna 1913. Niiden tilalle tulleet laajemmat määräykset: *Betoni- ja rautabetonirakenteiden määräykset*, laati Suomeen vastaperustettu betoniyhdistys vuonna 1929. Määräykset käsittelivät betonirakentamista koko valtiossa ja ottivat mallia saksalaisista betoninormeista.²⁸

2.3 Sementtiteollisuus Suomessa

Joseph Aspdin aloitti portlandsementin teollisen valmistuksen Englannissa heti patentin saamisen jälkeen 1820-luvulla. Ranskassa ensimmäinen sementtituotanto alkoi vuonna 1853. Saksassa se alkoi vuonna 1855 ja Venäjällä vuonna 1856.²⁹ Ruotsissa sementin valmistus aloitettiin Skoonessa vasta vuonna 1874³⁰.

Portlandsementin tuonti Suomeen mainitaan ensimmäistä kertaa vuonna 1856. Toisaalta ensimmäinen betonirakenne Suomessa, Saimaan kanavan muurirakenteet, alettiin rakentaa jo 1850-luvun alussa ja ne valmistuivat vuonna 1856. Todennäköisimmin sementtiä poltettiin paikan päällä Narvan seudulta tuodusta kalkista ja ruotsalaisesta alunaliuskeesta.³¹

²⁴ Konow 2005, 6

²⁵ Hurme ym. 1991, 20

²⁶ Urquhart 2013, 7

²⁷ Souponitski ym. 1999, 203

²⁸ Hurme ym. 1991, 20

²⁹ Konow 2005, 4-5

³⁰ Ahlberg 2012, 52

³¹ Hurme ym. 1991, 31–32

1930-luvulla suoritettut tutkimukset osoittivat, että betonin sideaine oli vanhanaikainen kalkin ja pozzolaanin seos³².

Suomen ensimmäisen sementtitehtaan perustivat vuonna 1869 Saviolle Herman Brummer ja Ernst Qvist.³³ Venäjän keisarikunnassa, jonka autonomian alla Suomi silloin oli, ensimmäinen portlandsementtitehdas alkoi toimia jo vuonna 1856. Sementin tuonti Suomeen Venäjänkeisarikunnasta oli kuitenkin hyvin epätodennäköistä, koska tehtaan tuottavuus oli pientä. Lisäksi 1900-luvun alkuun asti portlandsementin tuonti Venäjän keisarikuntaan Englannista ja Saksasta oli suuri.³⁴



Kuva 7. Paraisten Kalkkivuori –sementtitehdas perustettiin vuonna 1914. Sementtiä valmistettiin alusta asti uudenaikaisissa kiertouuneissa (Sarlin 1925, 13).

Savion sementtitehtaan toiminnan alku 1870-luvulla oli varsin vilkasta. Kotimaista portlandsementtiä käytettiin esimerkiksi 1870-luvun alussa rakennetussa Sinebryhoffin olutkellarin eristysmuurauksessa. Vuonna 1876 Kaivopuiston taide- ja teollisuusnäyttelyssä Savion sementtitehdas ja Brummerin rakennusliike esittivät betonista valmistetun suihku-kaivon.³⁵

Savion sementtitehtaan tuotanto vähentyi huomattavasti 1880-luvulla. Vuosien 1887–94 aikana sementtitehtaan toiminnassa oli pitkiä taukoja huonon kannattavuuden takia ja sementin valmistus lopetettiin kokonaan vuonna 1894.³⁶ 1900-luvun alussa tapahtuneen teräsbetonirakentamisen nousun myötä, sementin tarve kasvoi huomattavasti. Vuosina 1901–1911 sementin tuonti ulkomailta kasvoi 600 %:lla³⁷. Vasta Paraisten Kalkkivuori –tehtaan avaamisen jälkeen vuonna 1914 oli käytettävissä kotimaista sementtiä. Vuonna 1919 toinen suomalainen sementtitehdas aloitti sementin valmistuksen Lohjalla.³⁸

³² Hurme ym. 1991, 114

³³ Hurme ym. 1991, 9

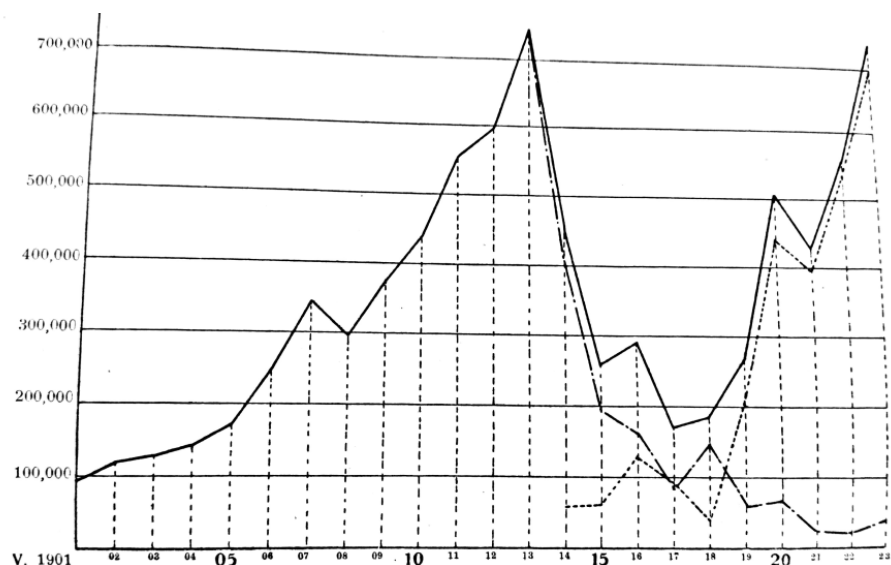
³⁴ Souponitski, Sniatkov ja Grigoriev 1999, 201-202

³⁵ Hurme ym. 1991, 31 ja Kaila 2000, 175

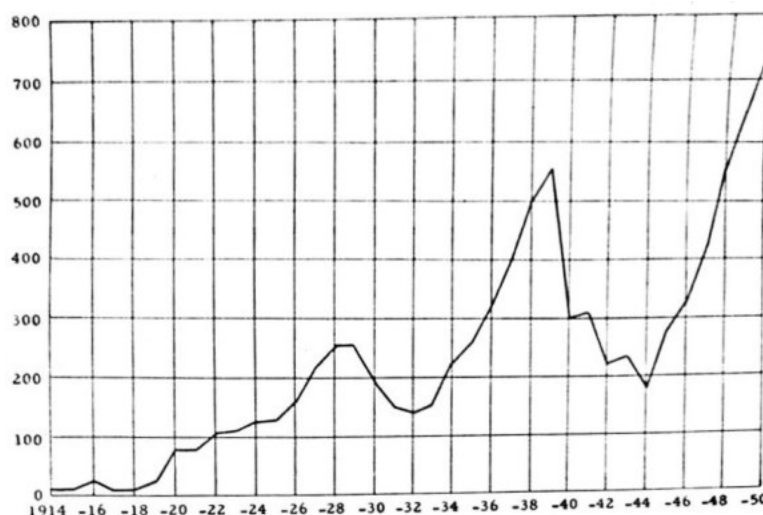
³⁶ Hurme ym. 1991, 9

³⁷ Neuvonen, Mäkiö & Malinen 2002, 28

³⁸ Hurme ym. 1991, 9



Kuva 8. Kuvassa on esitetty sementin kulutus vuosina 1901–1923. Vuodesta 1901 vuoteen 1913 sementin kulutus kasvoi tasaisesti. Vuodesta 1913 vuoteen 1918 sementin kulutus oli laskussa ja sen jälkeen kasvoi vuoden 1913 lukemiin. (Sarlin 1925, 18).



Kuva 9. Kuvassa on esitetty sementin tuotanto vuosina 1914–1950. Sementin tuotannon nopea kasvu alkoi vuoden 1918 jälkeen ja saavutti vuonna 1928 noin 250 000 tonnia. Sen jälkeen tuotanto lähti laskuun 1930-luvun alussa. (Nykänen 1951, 11)

2.4 Betonirakennusteollisuus Suomessa

Varhaisimmat betoni- ja teräsbetonirakenteiden valmistajat Suomessa olivat ulkomaalaisia yrityksiä kuten saksalaiset yritykset Wayss & Freytag A. G. ja Mayer & Sohn. Näiden jälkeen Suomen markkinoille tuli muitakin rakennusliikkeitä: pietarilainen Adhaesion, saksalais-ranskalainen Aemé Beton ja ruotsalaiset Kreuger & Toll sekä Ab Beton.³⁹

Ensimmäinen suomalainen betonivalimo oli todennäköisesti Julius Tallbergin perustama Helsingin sementtivalimo eli Helsingfors Cementgjuteri Ab. Vanhojen osakekirjojen mukaan Helsingin sementtivalimo perustettiin vuonna 1888⁴⁰. Tallbergin valimo valmisti myös vuosina 1888–1891 Johanneksen kirkon betoniset julkisivukoristeet⁴¹.

³⁹ Hurme ym. 1991, 35

⁴⁰ Pörssitieto

⁴¹ Pyykkö 1992, 51

Vuonna 1895⁴² rakennusmestari Richard Helander perusti Tampereelle rautabetoni- ja rakennusliikkeen, josta 1900-luvun alussa muodostui Tampereen sementtivalimo. Helanderin rakennusliike oli mukana monissa merkittävässä teräsbetonirakennusprojekteissa, kuten Helsingin päärautatieasema.⁴³



Kuva 10. Rich. Helanderin rakennusliikkeen mainos vuodelta 1914. Richard Helanderin Rakennusliikkeen suurin ja merkitsevin projekti 1900-luvun alussa oli Helsingin rautatieasema (Teknillinen aikakauslehti 1914/5-6, 5)

Helsingin kustannusosakeyhtiön julkaiseman *Kotimaisen teollisuuden albumin*⁴⁴ mukaan vuonna 1913 Suomessa rakennusalalla toimi seitsemän kotimaista sementtivalimoa:

- O.Y. Lemminkäinen,
- Helsingin sementti- ja asfalttiliike
- Hyvinkään hiekkatiili- ja sementtivalimo-osakeyhtiö,
- Lahden Sementti, asfaltti ja kalkki oy,
- Tampereen sementtivalimo ja rautabetoni oy,
- Turun sementtivalimo oy,
- Viipurin sementtivalimo osakeyhtiö.

Niistä suurin osa suoritti myös rautabetonitöitä, mutta *Hyvinkään hiekkatiili- ja sementtivalimo-osakeyhtiö* ja *Lahden Sementti, asfaltti ja kalkki oy* valmistivat vain betonielementtejä⁴⁵.

2.5 Betonirakentaminen Suomessa

1800-luvun jälkipuoliskolla betonia käytettiin Suomessa pääosin perustuksiin, vesirakenteisiin ja esivalmistettuihin elementteihin kuten viemäriputkiin⁴⁶ ja julkisivun koriste-elementteihin⁴⁷. Lisäksi hyvin varhaisessa vaiheessa huomattiin teräsbetonin soveltuvuus teollisuusrakenteiden rakennusmateriaaliksi. Alkuvaiheessa betonista valmistettiin vain koneenalustoja kuten vuonna 1876 valmistuneessa Finlaysonin suuressa Plevna-kutomorakennuksessa. Teräsbetoniset välipohjarakenteet yleistyvät vasta 1890-luvulla teknologian kehittymisen myötä.⁴⁸

⁴² Teknillinen aikakauslehti 1914/5-6, 5

⁴³ Hurme ym. 1991

⁴⁴ Helsingin kustannusosakeyhtiö 1913

⁴⁵ Helsingin kustannusosakeyhtiö 1913

⁴⁶ Hurme ym. 1991, 10

⁴⁷ Neuvonen, Mäkiö & Malinen 2002, 28

⁴⁸ Hurme ym. 1991, 40–42

Yksi ensimmäisistä esimerkeistä betonin käytöstä rakennuksen perustuksiin on arkkitehti K. A. Wreden suunnittelema suuri kauppapasaasi Helsingin Esplanadin varrella. Rakennus on toteutettu vuosina 1882–92. Hirsipaalujen päälle valettiin betonista ylösalaisin käännetty holvit teräskiskojen varaan. Toisena varhaisena esimerkkinä voidaan mainita arkkitehti Gustaf Nyströmin suunnittelema ja vuonna 1898 valmistettu Suomen Yhdyspankin toimitalo Helsingin Aleksanterinkadulle.⁴⁹

Ensimmäinen mittava esimerkki betonin käytöstä vesirakenteissa on vuoden 1889–1889 Hangon valtionsataman laajennus. Aallonmurtajan laajennus koostuu puuarkuista rakennetuista osastoista, joista uloimmat osastot täytettiin laihalla betonilla ja keskimmäiset osastot kivillä. Uskottiin, että noin kolmen metrin paksuiset betonoidut osastot tekevät aallonmurtajasta vesitiiviin rakenteen. Työmaalle hankittiin Hampurista käytetty, höyrykoneella toimiva rumpusekoitin. Tämä on ensimmäinen tieto koneistetun betoniaseman käytöstä Suomessa.⁵⁰

Merkittävimmit esimerkit betonin käytöstä julkisivun koriste-elementeissä ovat Ateneumin ja Johanneksen kirkon julkisivujen veistokset. Valtion taidemuseo Ateneum-rakennus valmistui vuonna 1888 ja sen suunnitelman on laatinut arkkitehti Theodor Höijer. Ateneumin julkisivun suuret karyatidi-veistokset ja päätykolmion veistosryhmän valmisti betonista ruotsalainen kuvanveistäjä C. E. Sjöstrand Münchenissä vuonna 1886. Ateneumin julkisivun veistokset ovat Suomen vanhimmat betoniveistokset.⁵¹



Kuva 11. Kuvassa on esitetty valtion taidemuseo Ateneum-rakennus heti rakennustöiden valmistumisen jälkeen. Ateneumin julkisivun suuret karyatidi-veistokset ja päätykolmion veistosryhmä ovat Suomen vanhimmat säilyneet betoniveistokset (Helsingin kaupunginmuseo 3, kuvankäsittely tekijän).

Vuonna 1891 valmistuneen Johanneksen kirkon suunnitteli arkkitehti Adolf Emil Melander. Sen julkisivun koriste-elementit valmisti suurliikemiehen Julius Tallbergin perustama sementtivalimo, joka oli todennäköisesti Suomen ensimmäinen sementtivalimo. Betonivalutöiden laajuus oli suuri. Julkisivun koriste-elementtien yhteismäärä on noin 4 000 kpl ja niiden valmistuksessa käytettiin 400 – 500 keskenään erilaista betonivalumuottia. Koriste-elementtien valun ja asennuksen kustannukset olivat noin 10 % kirkon rakentamisen kokonaiskuluista.⁵²

1890-luvulla arkkitehti Karl Gustaf Nyström tutki betonisia välipohjia ja niiden tulenkestävyyttä kaupungin yleisen palovakuutusyhtiön lausuntopyynnöstä. Nyström jakoi kaikki betoniset välipohjat kahteen päätyyppiin: 1) paikalla valettu betonivälipohja, jota kantaa

⁴⁹ Hurme ym. 1991, 34

⁵⁰ Hurme ym. 1991, 114–116

⁵¹ T. Sonninen Oy 2011, 3

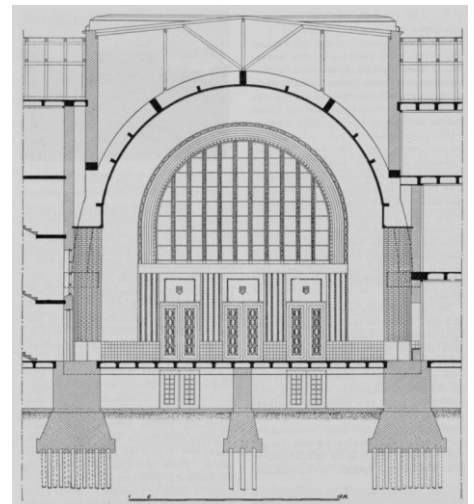
⁵² Pyykkö 1992, 51–53

teräksiset kannatinpalkit ja 2) sementtitehtaassa valettu elementtivälipohja. Nyström mainitsi myös Monier-raudoitusjärjestelmään perustuvan välipohjan rakenteen ja sen käytön Suomessa. Vuoteen 1900 mennessä Monier-tyyppisiä välipohjia käytettiin Tampereen Verkatehtaalla, Finlaysonin ja tulitikkutehtaan teollisuusrakennuksissa sekä Tirkkosen lii-kerakennuksessa, Vaasan sokeritehtaassa, puuvillatehtaassa ja höyrymyllyn uudisrakennuksissa. Vuonna 1902 valmistuneesta Suomen Kansallisteatterin rakennuksesta betonisen alapohjan lisäksi löytyy betonisia välipohjia.⁵³

1900-luvun alussa uudet rakennusteknologiat toivat uusia mahdollisuuksia betonirakentamiseen, mikä aiheutti teräsbetonirakentamisen nousun. Hennebique-pilaripalkkijärjestelmä mahdollisti uudenaikaisen toimivampien teollisuus- ja lii-kerakennuksien sekä julkisien rakennuksien toteuttamisen. 1910-luvulla tehtiin myös ensimmäisiä betonielementtien kokeiluja.

Laajasti Euroopassa käytetty Hennebique-järjestelmä sai suosiota myös Suomessa vuoden 1900 Pariisin maailmannäyttelyn jälkeen. Hennebique-järjestelmä otettiin nopeasti käyttöön sekä tehdasrakennuksissa että julkisissa rakennuksissa, kuten vuonna 1904 rakennetun Tampereen Klingendahlin kutomon ja Frenckelin paperitehtaan rakennuksissa sekä vuonna 1905 rakennetun Viipurin suomalaisen tyttökoulun rakennuksessa. Vuonna 1909 rakennettiin Pohjoismaiden suurin ja uudenaikaisin tapettitehdas Tampereen Epilään. Suunnittelusta vastasi arkkitehti Lambert Pettersson ja rakennesuunnittelun suoritti Otto Weyerstall. Välipohjat valettiin Hennebique-menetelmällä ja niitä kannattivat ontot nelikulmaiset teräsbetonipilarit. Lukuun ottamatta seinämuurausta rakennustyö valmistui ennätysajassa (kymmenessä viikossa), mikä osoitti järjestelmän toimivuuden.⁵⁴

1900-luvun alun laajamittaisin ja rakennustaiteellisesti merkittävin teräsbetonirakenne oli vuonna 1904 arkkitehdin Eliel Saarisen suunnittelema Helsingin rautatieasema. Rautatieasema rakennettiin vuosina 1908–1915. Teräsbetonisuunnittelusta vastasi insinööri Jalmar Castren ja rakentamisesta vastasivat Richard Helanderin Rakennusliike (asemarakennus) ja Viipurin Sementtivalimo (pikatavaratoimisto).⁵⁵



Kuva 12. Helsingin rautatieasema on oman aikansa laajamittaisin ja merkittävin teräsbetonirakenne. Vasemmassa kuvassa on uuden rautatieaseman valokuva sen valmistamisen jälkeen 1910-luvulla (Helsingin kaupunginmuseo 2). Oikeapuolisessa kuvassa on rautatieaseman pääsisäänkäynnin rakennepiirustus (Tekninen aikakausilehti 1914/5-6, 117).

⁵³ Hurme ym. 1991, 33–42

⁵⁴ Hurme ym. 1991, 38–43

⁵⁵ Hurme ym. 1991, 39–40

Uuden rautatieaseman suuren yhteiskunnallisen merkityksen takia työmaalla käytettiin uusia betonirakentamisteknologioita ja -tietoja. Työmaalla käytettiin muun muassa nostokonetta ja betonin sekoituskonetta, joka on esitetty kuvassa 13. Rakennusaikana oli tietoisuus sementin ja kiviainesten laadun, niiden seossuhteen, survonnan, vesimäärän ja ilman lämmön vaikutuksesta betonilujuuden kehitykseen. Betonin laadun takaamiseksi työmaalla valettuja betonikuutioita ja koepalkkeja tutkittiin Teknillisen korkeakoulun aineenkoetuslaitoksella.⁵⁶



Kuva 13. 1900-luvun alussa uusia teknologioita käytettiin isoilla työmailla. Kuvassa esitetty betonin sekoituskonetta Helsingin päärautatieaseman työmaalla vuonna 1914 (Teknillinen aikakausilehti 1914/5-6, 112).

Toinen 1900-luvun alun merkittävä julkinen rakennus, jonka rakentamisessa käytettiin betonia, on Suomen Kansallismuseo. Rakennus on Gesellius-Lindgren-Saarinen -toimiston suunnittelema ja se on rakennettu vuosina 1906–1910. Suomen Kansallismuseon rakennuksen välipohjat ja osa holveista valettiin betonista. Keskiahallin korkeat holvit kuitenkin muurattiin perinteisellä tavalla tiilestä, koska se toimi paremmin rakentajan mielestä freskojen pohjana betoniin verrattuna.⁵⁷

Teräsbetonin käyttö liikelalojen runkorakenteissa mahdollisti suurten näyteikkunoiden avaamisen katutasoon. Lisäksi uudet runkojärjestelmät mahdollistivat kantavien väliseinien määrän vähentämisen. Tämä johti suurien avarioiden myyntisalien rakentamiseen. Vuonna 1909 valmistui Suomen ensimmäinen merkittävä teräsbetoninen liikerakennus – Helsingin Hamsterin liikelato Aleksanterinkadulla. Rakennuksen suunnitteli arkkitehti Selim Lindqvist ja toteutti pietarilainen F. Mieritz & J. Gerassimow –rakennusliike. Uusia liikelatoja teräsbetonista rakennettiin myös Turkuun ja Tampereelle. Vuosisadan alun liikerakentamisen kehityksen huippuna on vuosina 1925–30 rakennettu Stockmannin tavaratalo Helsingin Mannerheimintielle. Rakennus on arkkitehti Sigurd Frosteruksen suunnittelema.⁵⁸

⁵⁶ Teknillinen aikakausilehti 1914/5-6, 109–121

⁵⁷ Hurme ym. 1991, 40

⁵⁸ Hurme ym. 1991, 54–56



Kuva 14. Stockmannin tavaratalo on 1900-luvun alkupuolen merkittävin liikerakentamisen teräsbetonirakennus. Vasemmassa kuvassa on tavaratalo rakennustöiden valmistumisen jälkeen 1930-luvulla (Museovirasto 1). Oikeassa kuvassa on vuoden 1920 suunnittelukuva (Suomen Kuvalehti 1920/26, 22).

Ennen vuotta 1911 kaikki Helsingin talot perustettiin puupaaluille. Vasta vuosina 1911–14 arkkitehti Armas Lingrenin suunnitelmien mukaan rakennettu vakuutusyhtiö Kalevalan graniittiverhoiltu liiketalo perustettiin ensimmäistä kertaa Suomessa betonipaaluille, joiden päälle on valettu raudoilla jäykistetty betoniantura.⁵⁹

Vaikka betonielementtitekniikan kehitys alkoi Suomessa 1910-luvulla, varsinaisia betonielementtirakennuksia alettiin rakentaa vasta toisen maailmansodan jälkeen. Ensimmäiseksi suomalaiseksi betonielementiksi voisi kutsua Tapanin-tiiliä, joka oli metrin pituinen ja 250 mm korkuinen. Tapani-tiilien lämpöeristeenä oli koksikuona. Elementtien koko 1900-luvun alussa pysyi pienenä nostureiden puutteesta johtuen monilla työmailla.⁶⁰

2.6 Betonirakentamisen opetus ja kirjallisuus Suomessa

Rakennustekniikan opetus Suomessa alkoi vuonna 1849, kun Helsinkiin perustettiin Teknillinen reaalkoulu. Ennen sitä opetusta oli mahdollista saada vain ulkomailla. Ensimmäisenä apuopettajana toimi norjalainen insinööri Andre Lekven, joka opetti yksinään kaikki rakennusinsinöörien tarvitsemat ammattiopinnot. Hänellä oli hyvät suhteet Saksan polyteknisiin opistoihin ja Lekven todennäköisesti toi ensimmäisenä tietoja Saksan betonitutkimuksista ja -rakenteista Suomeen.⁶¹

Varhaisimmat kotimaiset artikkelit julkaistiin Ruotsiksi *Tekniska Föreningen i Finland Förhandlingar* –lehdessä vuodesta 1880 alkaen ja suomeksi *Suomen Teolisuuslehdessä* vuodesta 1882 alkaen. 1900-luvun alussa rakentamista käsittelevien lehtien määrä kasvoi. Vuonna 1890 alettiin julkaisemaan *Teknikern*-lehteä, vuonna 1905 *Rakennustaito*-lehteä ja vuonna 1911 *Teknillistä Aikakausilehteä*.⁶²

Helsingin Polyteknillisen opiston itävaltalainen luennoitsija Mikael Strukel vuosina 1895–1914 julkaisi luentomateriaalinsa saksankielisinä kirjoina: *Der Grundbau* (1895), *Der Wasserbau* (1904) ja *Der Brückenbau* (1910–1914). Kirjat sisältävät 1900-luvun alun koko tietämyksen rakennusinsinööritieteistä ja niitä käytettiin oppikirjoina Helsingin Polyteknillisen opiston lisäksi eräissä Saksan ja Itävallan teknillisissä korkeakouluissa.⁶³

⁵⁹ Hurme ym. 1991, 35

⁶⁰ Kaila 2000, 182–183

⁶¹ Hurme ym. 1991, 9–10

⁶² Hurme ym. 1991, 37

⁶³ Hurme ym. 1991, 13

Ensimmäisenä kotimaisena kirjana kuitenkin pidetään Turun teollisuuskoulun lehtorin, arkkitehti G. E. Aspin vuonna 1908 julkaisemaa *Huonerakenteiden oppi* -kirjaa⁶⁴. Kirjassa on kiinnitetty todella vähän huomiotta betonin valmistukseen ja valintaan. Tämän sijaan erilaisten rakenneosien toteuttamisesta on annettu laaja kuvaus kuvituksen kera.

Arkkitehti Vietti Nykäsen kirja *Rautabetoni, pääpiirteinen esitys sen synnystä, ominaisuuksista, teoriasta ja käytäntötavoista* ilmestyi vuonna 1911. Kirjan lyhennetty versio *Lyhyt rautabetoniopas* ilmestyi vuonna 1913.⁶⁵ Kirjoissa on esitetty tiivistetyssä muodossa perustietoja betonin ominaisuuksista ja valmistuksesta. Sekä Nykänen että Aspin käyttivät päälähteinään saksalaisen Carl Kerstenin teosta *Der Eisenbetonbau*.

Vuonna 1913 ilmestyi suomennos Suomessa asuvan saksalaisen insinöörin Otto Wejerstallin kirjasta *Sementti, betoni ja rautabetoni*. Alkuperäinen kirja *Elementarbol för Cement-Beton & Järnbeton* julkaistiin vuonna 1912 ruotsiksi. Carl Kerstenin teos kuten monet muutkin saksankieliset teokset löytyy Wejerstallin kirjan lähdeluettelosta.⁶⁶ Kirja poikkeaa aikaisemmista julkaisuista sillä, että Wejerstallin selitti perusteellisesti betonin valmistusvaiheet.

Vuonna 1922 ilmestyi M. Muoniovaaran viisiosainen julkaisu *Sementti ja sen käyttö*.⁶⁷ Kirjoissa on käsitelty mm. kiviainesjakauman ja vesimäärän vaikutusta betonin ominaisuuksiin. Nämä tiedot olivat ilmeisesti todella uusia 1920-luvun Suomessa.

Vuonna 1924 Bertel Geitlin ja N. V. Troupp julkaisivat kirjan *Portlandsementti ja sen käyttö*. Kirjassa on esitetty Paraisten Kalkkivuori Oy:n kemialisessa laboratoriossa ja ainekoetuslaitoksessa suoritettujen betonikokeiden tuloksia.

⁶⁴ Hurme ym. 1991, 37

⁶⁵ Hurme ym. 1991, 37

⁶⁶ Hurme ym. 1991, 37

⁶⁷ Hurme ym. 1991, 37

3 Historiallisten betonien valmistustekniikka

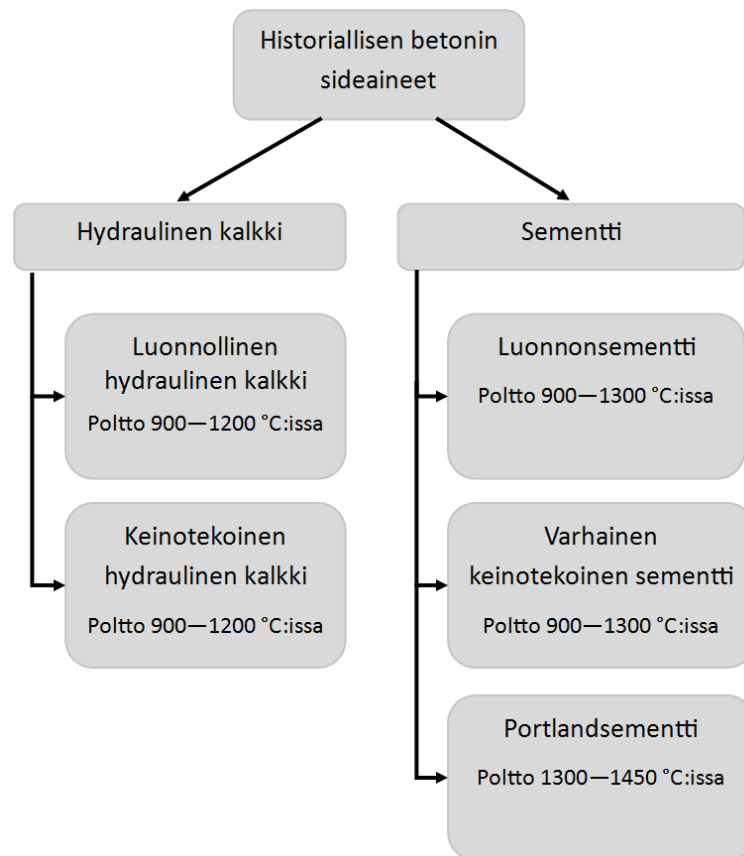
Tässä luvussa käsitellään, minkälaisia osa-aineita ja valmistusteknologioita käytettiin Suomessa ennen vuotta 1930 historiallisten betonien valmistuksessa.

Yleisen määritelmän mukaan betoni on sideainesta, karkeasta tai hienosta kiviaineksesta ja vedestä keinoitekoisesti valmistettu luja rakennusmateriaali. Betonin ominaisuuksia on mahdollista parantaa erilaisilla seos- ja lisäaineilla.

3.1 Historialliset sideaineet

3.1.1 Historiallisten sideaineiden lajittelu

Nykyään betonin sideaineena käytetään pääosin sementtiä. Ennen vuotta 1930 betonin sideainevalinta oli paljon laajempi kuin nykyään. Tuon ajan rakennuskirjallisuudessa mainitaan monia eri materiaalivaihtoehtoja. Vuonna 1911 Nykäsen⁶⁸ julkaisemassa teoksessa mainitaan kuusi eri sideainetta: potsolaania, romaani-, vesikalkki-, portland-, rautaportland- ja kuonasementit.



Kuva 15. Betonin sideaineet voidaan jakaa kahteen ryhmään ja viiteen alaryhmään valmistusteknologian perustella. Valmistusteknologia vaikuttaa paljon eri historiallisien sideaineiden ominaisuuksiin.

Käytännössä historiallisen betonin sideaineet voidaan jakaa kahteen pääryhmään: hydraulinen kalkki ja historiallinen sementti⁶⁹. Hydraulinen kalkki jaetaan luonnolliseksi ja keinotekoiseksi valmistusmenetelmän perustella. Historiallinen sementti sen sijaan voidaan luokitella luonnonsementtiin, varhaiseen keinotekoiseen sementtiin ja historialliseen portlandsementtiin.⁷⁰ Betonin sideaineiden jako on esitetty kuvassa 15.

⁶⁸ Nykänen 1911, 8

⁶⁹ Hughes, Swann & Gardner 2007, 25

⁷⁰ Hughes ym. 2007, 25

Nykyään *hydraulisen kalkin* ja *sementin* -termien tarkoista määritelmistä sekä niiden oikeanmukaisesta käytöstä on erilaisia käsityksiä. Syynä siihen on epäselvä raja kahden sideainetyypin välillä.⁷¹ Sideainetyypit eroavat toisistaan niin raaka-aineiden, valmistustapojen kuin mikrorakenteidensakin osalta. Tässä luvussa käydään läpi eri sideaineiden valmistusten eroja. Näistä valmistusmetodeista johtuvia eroja mikrorakenteessa käsitellään luvussa 4.1.

Hydraulista kalkkia valmistettiin kalkkikiven ja saven sekoituksesta polttamalla sitä uunissa 900 – 1200 °C lämpötilassa. Savi voi sisältyä epäpuhtautena kalkkikiveen (luonnollinen hydraulinen kalkki) tai voi olla erikseen lisättyä (keinotekoinen hydraulinen kalkki). Polton jälkeen hydraulinen kalkki sammutettiin vedellä. Nopea jäähdytys johti hydraulisen kalkin hajoamiseen hienoksi rakeeksi.⁷²

Sana *luonnollinen* viittaa siihen, että raaka-aineena käytetty kalkkikivi sisältää valmiiksi kaikki tarvittavat oksidit (kalkki, piidioksidi, alumiinioksidi jne.). Sen takia jokainen luonnollinen hydraulinen kalkki heijastaa paikallista geologiaa. Toisaalta luonnollisten hydraulisten kalkkien laatujen välillä on suurta vaihtelua. Sama asia koskee luonnonsementtejä, joiden valmistusteknologiassa on paljon samankaltaisuuksia luonnollisen hydraulisen kalkin valmistuksen kanssa. Sana *keinotekoinen* vastaavasti viittaa siihen, että oikea koostumus saavutetaan sekoittamalla eri raaka-aineita. Valmistusmenetelmällä saadun sideaineen laatu on tasaisempi valmistuspaikasta riippumatta.⁷³

Luonnonsementtiä valmistettiin savipitoisesta kalkkikivestä polttamalla sitä uunissa 900 – 1300 °C lämpötilassa. Valmistuksessa käytettiin noin 25 % tai enemmän savea sisältäviä kalkkikivilajeja. Suuren savipitoisuuden ansiosta polton jälkeen vapaan kalkin pitoisuus luonnonsementissä oli lähes nolla.⁷⁴ Modernit valmistajat määrittävät luonnonsementin vapaan kalkin pitoisuudeksi alle 5 %. Näin pienellä vapaan kalkin pitoisuudella poltetun massan sammuttaminen ei onnistu hydraulisen kalkin tapaan ja siksi se jauhetaan hienoksi. Tunnetuin luonnonsementtilaji on romanisementti. Sitä valmistetaan merkelikivestä.⁷⁵

Historiallista portlandsementtiä valmistettiin kalkkikiven, saven ja mahdollisten lisäaineiden (kuten esim. kipsi) sekoituksesta. Portlandsementin valmistus vaati raaka-aineiden polttamista noin 1450 °C:ssa, jossa raaka-aineiden sintraantuminen tapahtuu.⁷⁶ Portlandsementtiä suositeltiin käytettäväksi betonin sideaineena suomalaisissa betoninrakentamisen oppaissa 1900-luvun alussa suuren lujuuden ja nopean sitoutumisen takia.⁷⁷

Nykyään Suomessa portlandsementiksi nimetään, standardin SFS-EN 197-1 mukaan, moderni sementti CEM I. Historiallinen portlandsementti vastaa osittain ominaisuuksiltaan ja valmistusteknologialtaan modernia sementtiä CEM I. Englanninkielisessä kirjallisuudessa sekaannusten välttämiseksi pitää huomioda, että termiä *Portland cement* käytetään edelleenkin sementin yleisenä terminä. Suomessa sen sijaan käytetään nykypäivänä termiä *sementti*.

⁷¹ Brocklebank 2006

⁷² Konow 2006, 11–16

⁷³ Hughes ym. 2007, 25–26

⁷⁴ Hughes ym. 2007, 25–26

⁷⁵ Hughes ym. 2007, 25

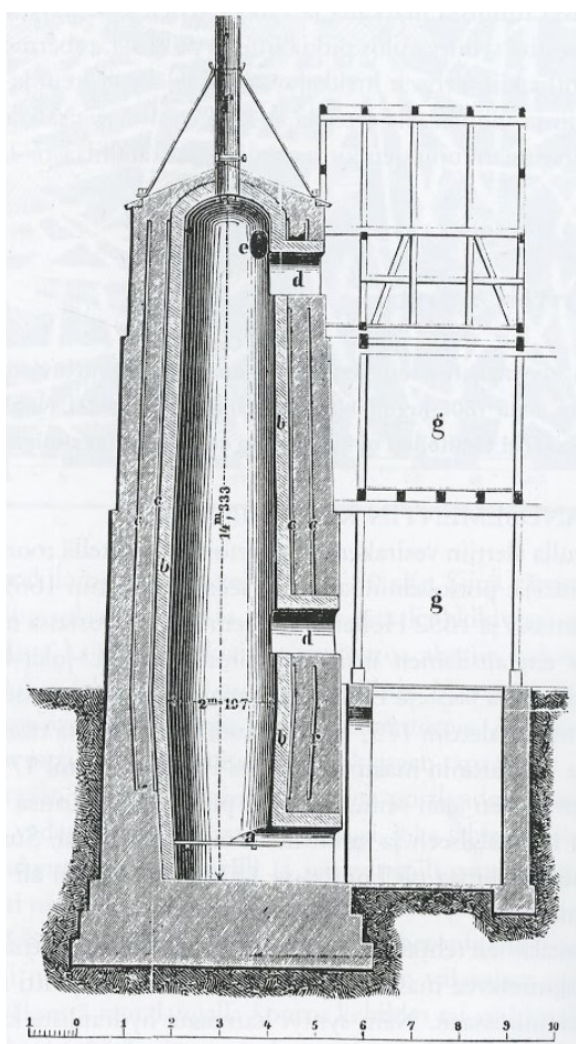
⁷⁶ esim. English heritage 2012 ja Hughes ym. 2007, 25–26

⁷⁷ esim. Asp 1908 ja Muoniovaara 1922b

Varhaista keinotekoista sementtiä valmistettiin samoista raaka-aineista kuin portlandsementtiäkin, mutta poltonlämpötila oli alhaisempi kuin 1300 °C. Alle 1300 °C poltetun sementin ominaisuudet ovat lähempänä hydraulisen kalkin ja luonnonsementin ominaisuuksia kuin portlandsementin ominaisuuksia. Vanhaa kirjallisuutta tutkiessa on otettava huomioon, että termi *portlandsementti* voi tarkoittaa myös varhaista keinotekoista sementtiä.

3.1.2 Historiallisten sementtien valmistus

Polttouunien kehitys vaikutti paljon sideaineiden laadun kehitykseen. 1800-luvulla sementtiä poltettiin pääosin perinteisissä kuilu-uuneissa, joita käytettiin aikaisemmin muun muassa hydraulisen kalkin ja tiilien polttoon⁷⁸. Esimerkiksi Aspdinin sementtitehtailla 1800-luvun puolivälissä sementtiä valmistettiin kuilu-uuneissa⁷⁹ ja poltonlämpötila oli alle 1220 °C⁸⁰. Suomen ensimmäisessä sementtitehtaassa Saviolla sementin polttoon käytettiin myös perinteisiä kuilu-uuneja.



Kuva 16. Kuvassa on esitetty kuilu-uunin periaattopiirros. Kalkkikiven ja saven sekoitusta ladattiin uuniin aukosta d. Samasta aukosta d vuorokerroksittain ladattiin myös polttoainetta. Uuni sytytettiin alhaalta aukosta a (Kaila 2000, 170).

⁷⁸ Kaila 2000, 170

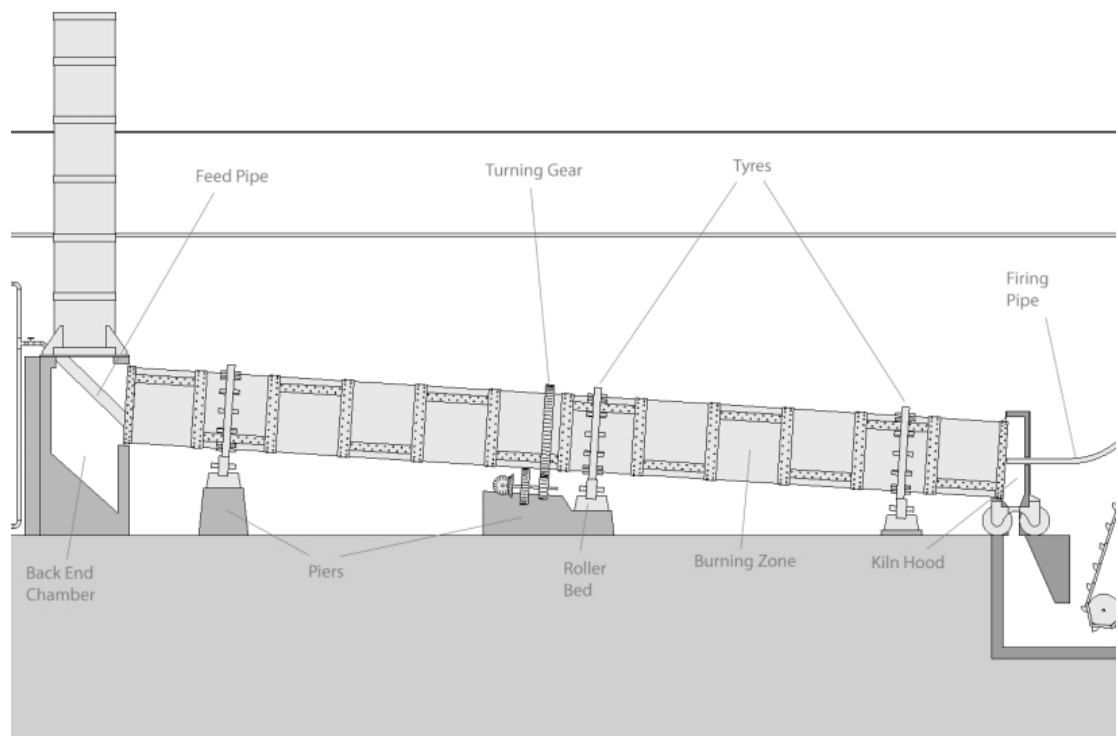
⁷⁹ Nykänen 1951, 6

⁸⁰ English Heritage 2012, 44

Ruotsissa sovellettiin ensimmäisissä sementtitehtaissa 1870-luvulla tiilitehtaiden valmistusmenetelmiä ja koneistoa. Kalkkijauhetta sekoitettiin huolellisesti puuroksi, jotta seoksesta saatiin mahdollisimman tasaista. Tämän jälkeen seos höyrytettiin kanaalisysteemillä, jonka jälkeen seos puristettiin raakatiiliksi ja poltettiin kuilu-uunissa. Lopuksi tiilet rikottiin ja jauhettiin sementiksi.⁸¹ Samantapainen sementin valmistusmenetelmä oli yleinen vielä 1910-luvun alussa⁸².

Korkean polttolämpötilan positiivista vaikutusta betonin lujuuteen huomattiin jo 1800-luvun puolivälissä. Isaac Johnson sai vuonna 1844 poltettua kuilu-uunissa modernin sementin kaltaista portlandsementtiä.⁸³ Kalsinointiin vaaditun korkean lämpötilan saavuttaminen kuilu-uuneissa ei ollut kuitenkaan kustannustehokasta. Portlandsementin polttoprosessin hyötysuhde kuilu-uunissa oli hyvin alhainen, koska osa raaka-aineesta jäi vajaapolttoiseksi ja sitä jouduttiin polttamaan uudestaan.⁸⁴

Oli toinenkin syy polttaa sementtiä alhaisemmissa lämpötiloissa. Sementin jauhaminen 1800-luvulla oli kalliimpaa ja vaikeampaa kuin pehmeämmän alhaisemmassa lämpötilassa poltetun sementin. Tämän takia haluttiin välttää kovien klinkkereiden eli sintratun sementin muodostamista.⁸⁵



Kuva 17. Kuvassa on esitetty vuoden 1899 kiertouunin mallin periaatepiirustus. Uuni oli 18 m pitkä ja halkaisijalta 1,5 m. Uunin pyörimistä ajettiin tyypillisesti keskusmoottorilta tulevilla hihnoilla. Polttokaasut vedettiin järjestelmän läpi pelkästään imulla. (Cementkilns)

Sementin polttoon paremmin soveltuvan kiertouunin kehitys alkoi 1870-luvulla Englannissa ja jatkui Amerikassa. Vasta vuonna 1898 amerikkalaiset insinöörit onnistuivat kehittä-

⁸¹ Ahlberg 2012, 52–53

⁸² Weyerstall 1913, 2

⁸³ Hurme ym. 1991, 9

⁸⁴ Kaila 2000, 170

⁸⁵ Konow 2006, 20

mään brittiläisten ideoiden pohjalta kustannustehokkaan kiertouunin.⁸⁶ Myös sementin jauhamisen teknologia kehitettiin 1800-luvun lopussa. Sideaineen valmistusteknologian kehityksen seurauksena kiertouunien käyttö alkoi yleistyä 1900-luvun alussa ensin Amerikassa ja vasta 1910-luvulla Euroopassa.⁸⁷

Uudet teknologiat saapuivat myös Suomeen ja 1910-luvun puolivälissä perustetuissa Suomen Paraisten ja Lohjan sementtitehtaissa sementtiä poltettiin alusta asti kiertouuneissa⁸⁸. Paraisten sementtitehtaalla 1920-luvulla sementin raaka-aineet jauhettiin ensin kuulamyllyillä. Jauhituksen aikana lisättiin vettä niin paljon, että karkeaksi jauhetun lietteen vesipitoisuus nousi yleensä noin 36 %:iin. Tämän jälkeen karkeata seosta jauhettiin putkimyllyillä, jotta saatiin riittävän hienoa jauhetta. Seuraavaksi raakaliete syötettiin 75 m pitkiin kiertouuneihin, joissa sitä poltettiin sintrauslämpötilassa kiinteän materiaalin muodostamiseksi. Lopuksi poltettu tuote jäähdytettiin ja jauhettiin. Näin saatiin sementtiä. Jauhituksen jälkeen sementtiin lisättiin yleensä kipsiä, jolla saatiin hidastettua sitoutumisaikaa.⁸⁹ 1900-luvun alussa sementin valmistusprosessi alkoi olla samantapainen kuin modernin portlandsementin valmistusprosessi.

On mahdotonta määrittää tarkka ajankohta, milloin betonin valmistuksessa siirryttiin hydraulisesta kalkista sementtiin. Betonin valmistusteknologian kehitys oli asteittainen 1800-luvun ja 1900-luvun alkupuolen aikana.⁹⁰ Sementin valmistusteknologian kehityksen perusteella on oletettavaa, että portlandsementti oli hyvin harvinainen 1800-luvulla ja alkoi yleistyä vasta 1900-luvun alussa.

Vanhassa kirjallisuudessa mainittu *portlandsementti* on todennäköisesti suurelta osalta varhaista keinotekoisista sementtiä, joka on ominaisuuksiltaan erilainen verrattuna moderniin portlandsementtiin. 1800-luvun loppupuolella betonin valmistukseen käytettiin todennäköisesti myös hydraulista kalkkia. Vasta 1900-luvun alkupuolen betonistandardien myötä hydraulista kalkkia ja sementtiä alettiin selkeästi erotella toisistaan⁹¹.

3.2 Kiviaines

Kiviaineksen osuus on yleensä noin 65–80 % betonin tilavuudesta. Tämän takia kiviaineksen ominaisuudet vaikuttavat suuresti betonin ominaisuuksiin.⁹² Nykyään kiviaineksen laatua ja sen soveltuvuutta betonin valmistukseen tutkitaan tarkasti. Kiviaineksen geometrisille, fysikaalisille ja mekaanisille ominaisuuksille asetetaan vaatimuksia erilaisilla standardeilla.⁹³ 1800-luvulla ja 1900-luvun alussa ymmärrettiin huonosti kiviaineksen laadun merkitystä betonin ominaisuuksiin.⁹⁴ Usein käytetty kiviaineksen laatu ja tyyppi heikensivät betonin ominaisuuksia.⁹⁵

Todennäköisesti kiviainesta hankittiin läheltä rakennuspaikkaa, koska raskaiden rakennusmateriaalien kuljettaminen pitkiä matkoja oli hankalaa ja kallista 1800-luvulla ja 1900-

⁸⁶ Konow 2005, 6

⁸⁷ Konow 2005, 6

⁸⁸ Kaila 2000, 170

⁸⁹ Sarlin 1925, 15–16

⁹⁰ Callebaut ym. 2000, 402

⁹¹ Callebaut ym. 2000, 402

⁹² esim. Urquhart 2013, 15 tai Suomen Betoniyhdistys ry. 2018, 43

⁹³ Suomen Betoniyhdistys ry. 2018, 43–45

⁹⁴ esim. Urquhart 2013, 15

⁹⁵ Urquhart 2014a, 5–6

luvun alussa⁹⁶. Tämän takia betonin kiviaines heijastaa yleensä paikallista geologiaa ja oli riippuvainen paikallisesta kivilajien saatavuudesta.

Vuoden 1913 betonirakentamisen oppaassa ohjeistettiin käyttämään betonin kiviaineksena kovia kivilajeja kuten piikiviä⁹⁷. Tästä poiketen yleisin kova kivilaji Suomessa on kuitenkin graniitti, joka koostuu eri mineraaleista kuten maasälvästä, kvartsista, ja kiilteestä⁹⁸. Nykyäänkin Suomessa usein käytetty kiviaines on paikallista graniittipohjaista luonnonkiviainesta⁹⁹. Lisäksi muita rakentamisessa käytettyjä kivilajeja ovat gneissi, kvartsiitti ja basaltti. Kiviaineksena luonnonkivien lisäksi käytettiin keinotekoisia materiaaleja kuten masuunikuonaa ja tiilimursketta.¹⁰⁰

1900-luvun alussa huokoista kiviainesta, kuten tiilikiven palasia tai kalkkikiveä ei suositeltu käyttämään betonin valmistukseen¹⁰¹. Siihen aikaa ymmärrettiin, että kiviaineksen huokoisuus heikentää betonin lujuutta. Tästä tiedosta huolimatta vuoden 1922 betonirakentamisen oppaassa sallittiin huokoisten kiviainesten käyttö silloin, kun betonirakenteen lujuusvaatimukset olivat alhaisia.¹⁰² Betonin lujuuden heikentämisen lisäksi huokoinen kiviaines lisää epätoivottua kosteuden liikettä betonissa ja edistää pakkasrapautumisen etenemistä betonissa¹⁰³.

Vuoden 1913 betonirakentamisen oppaassa mainittiin, että kuonaa käytettiin kiviaineksena todella usein¹⁰⁴. Koksikuonaa käytettiin muun muassa betonin lämmön- ja ääneneristyksen parantamiseen¹⁰⁵. Kuona saattaa kuitenkin sisältää poikkeuksellisia aineita kuten palamattomia hiilen jäännöksiä, joilla voi olla haitallisia vaikutuksia betonin ominaisuuksiin. Lisäksi palamattomat hiilen jäännökset lisäävät betonin rikkipitoisuutta, mikä edistää raudoitusten korroosiota.¹⁰⁶

Suomenkielisissä betonirakentamisen oppaissa ohjeistettiin käyttämään pääosin puhdistettua kiviainesta ilman kasviaineista, likaisuuksia ja savea¹⁰⁷. Englannin historiallisten betonien tutkimukset kuitenkin osoittavat, että siellä käytettiin myös kiviainesta, joka sisälsi reaktiivisia aineita. Haitallisten aineiden esiintyminen betonissa aiheutti kiviaineksen huonoa tartuntaa sideaineeseen. Lisäksi reaktiiviset aineet saattoivat kiihdyttää korroosion etenemistä. Joskus kiviaineksena käytettiin myös merisuoloja sisältäviä rantakiviä. Suola aiheuttaa muun muassa betonin pinnan rapautumista ja tehostaa korroosion etenemistä.¹⁰⁸

3.3 Lisäaineet

Betonin ominaisuuksia voidaan parantaa ja säädellä erilaisilla lisäaineilla. Modernien betonien valmistuksessa käytetään yleensä lisäaineita kuten huokostimia, notkistimia, hidastimia, kiihdyttimiä, vahvistuskuituja.¹⁰⁹ 1800-luvulla ja 1900-luvun alussa lisäaineita beto-

⁹⁶ Urquhart 2014a, 5-6

⁹⁷ Nykänen 1913, 11–12

⁹⁸ Konow 2005, 9

⁹⁹ Suomen Betoniyhdistys ry. 2018, 43

¹⁰⁰ Konow 2005, 9

¹⁰¹ Asp 1908, 106

¹⁰² Muoniovaara 1922b, 3

¹⁰³ Urquhart 2014a, 5-6

¹⁰⁴ Nykänen 1913, 13

¹⁰⁵ Muoniovaara 1922b, 3

¹⁰⁶ Urquhart 2013, 15 ja Nykänen 1913, 13

¹⁰⁷ Asp 1908, 106 ja Nykänen 1913, 11–12

¹⁰⁸ Urquhart 2013, 15

¹⁰⁹ Suomen Betoniyhdistys ry. 2018, 60–67

nin valmistuksessa käytettiin pääosin sementin määrän vähentämiseksi, koska sementti oli silloin betonin kallein ainesosa.¹¹⁰

Aikakauden suomenkielisestä betonikirjallisuudesta ei löydy paljon tietoja lisäaineiden käytöstä historiallisien betonien valmistukseen Suomessa. On kuitenkin mahdollista olettaa, että 1800-luvun lopussa ja 1900-luvun alussa Suomessa betonin valmistukseen käytettiin samanlaisia lisäaineita kuin muurauslaastien valmistuksessa. Historiallisien muurauslaastien pakkasenkestävyyttä käsittelevässä diplomityössä Joonas Lehtonen¹¹¹ mainitsi monia muurauslaastien lisäaineita. Lehtosen mukaan historiallisissa muurauslaasteissa käytettiin pääosin orgaanisia lisäaineita, joita on mahdollista jakaa *proteiinipitoisiin lisäaineisiin* (kananmuna, maito, veri, ihra yms.) ja *polysakkaridiin* (olut, hunaja, siirapit, tärkkelyspohjaiset hyyytelöt yms.).

Proteiinipitoiset lisäaineet paransivat laastin tartuntaominaisuuksia ja hidastivat karbonatisoitumista. Lisäksi Poznanin teknillisen yliopiston tutkimukset osoittivat, että veri laastin lisäaineena parantaa laastin pakkasenkestävyyttä lisäämällä ilmahuokosten määrää. *Polysakkaridit* paransivat laastin tartuntaa ja sitkeyttä. Sivuvaikutuksena polysakkaridit mahdollisesti kiihdyttivät laastien karbonatisoitumista. Lisäksi on mahdollista, että betonirakenteiden vahvistamiseksi muurauslaastien tapaan käytettiin olkia, pilkottua narunpätkiä tai hiuksia.¹¹² Kirjallisuuskatsauksen tiedot vahvistavat orgaanisten lisäaineiden kuten voin ja sokerin käytön betonin valmistuksessa Belgiassa 1900-luvun alussa¹¹³.

Historiallisien lisäaineiden tutkimusta vaikeuttaa se, että orgaanisia aineita on haastava havaita betoninäytteistä nykyisillä tutkimusmenetelmillä. Orgaaniset aineet hajoavat nopeasti ja niiden jälkiä on mahdollista havaita ainoastaan betonissa esim. termooanalyttisesti.¹¹⁴

Orgaanisten lisäaineiden lisäksi 1900-luvun alkupuolen betonirakentamisen oppaista löytyy viittauksia epäorgaanisten lisäaineiden käytöstä. Vuoden 1913 oppaassa ohjeistettiin käyttämään kalkkia betonin vedenpitävyyden parantamiseksi. Kalkin sallittu määrä oli 0,5–2 paino-osaa 1 paino-osa sementtiä kohden.¹¹⁵ Belgiassa betoniin lisättiin 2–6 p- % kalsiumkloridia betonin sitoutumisen ja kovettumisen nopeuttamiseksi sekä pakkasenkestävyyden parantamiseksi.¹¹⁶

3.4 Seossuhteet

Betonin osa-aineiden seossuhteella voidaan vaikuttaa betoniin ominaisuuksiin, kuten lujuus-, muodonmuutos- ja säilyvyysominaisuuksiin. Betonin seossuhdetta voidaan ilmoittaa muodossa sideaine: kiviaines tai sideaine: hieno kiviaines: karkea kiviaines. Nykyään seossuhteita ilmoitetaan osa-aineiden painosuhteiden avulla.¹¹⁷ Ennen vuotta 1930 betonin seossuhteita ilmoitettiin tilavuussuhteina¹¹⁸.

¹¹⁰ Hellebois ym. 2013, 150

¹¹¹ Lehtonen 2016, 22–23

¹¹² Lehtonen 2016, 22–23

¹¹³ Hellebois ym. 2013, 150

¹¹⁴ Koskinen 2019b, haastattelu

¹¹⁵ Nykänen 1913, 20

¹¹⁶ Hellebois ym. 2013, 150

¹¹⁷ Suomen Betoniyhdistys ry. 2018, 155–160

¹¹⁸ esim. Nykänen 1911 tai Maunuvaara 1922

Tilavuussuhteiden käyttö betonin valmistuksessa johti betonilaadun vaihteluun,¹¹⁹ koska osa-aineiden määrä riippui materiaalien annostelun tiiveydestä/ materiaalin tiheydestä. Näin yksi litraa sideainetta saattoi painaa 1,4 -1,95 kg¹²⁰ riippuen siitä, kuinka tiivistä aines oli pakattu. Tilavuus ja painosuhteiden ero on osa-aineiden pakkaamisesta riippuen 5-20 %.

Historiallisten betonien seossuhteiden valinnassa huomioitiin, samoin kuin modernien betonien valmistuksessa, betonirakenteen käyttötarkoitus, muotin koko ja raudoitusten jako. 1800-luvun loppupuolen ja 1900-luvun alun betonioppaissa mainitaan erilaisia seossuhteita arvojen 1:2 ja 1:6:12 välissä¹²¹. Tämän tiedon mukaan historiallisten betonien sideainemäärä voi olla 150–550 kg/m³.

1800-luvun lopun 1900-luvun alun betonirakenneoppaissa ohjattiin käyttämään ulkoilman rasituksille alttiille rakenteille sideainepitoista betonia¹²². Esimerkiksi 1800-luvun loppupuolen kirjallisuudessa koriste-elementtejä ohjattiin valmistamaan portlandsementistä ja hienorakeisesta 0/3 mm kiviaineksesta seossuhteella 1:2¹²³. Tällä tavalla historiallisten koriste-elementtien sideainemäärä on voinut olla 450–550 kg/m³ vesimäärästä riippuen.

1800-luvun lopun 1900-luvun alun tavanomaisten maanpäällisten rakenteiden betonien sideainemäärä oli huomattavasti pienempi kuin koriste-elementtiensideainemäärä betonirakenneoppaiden mukaan¹²⁴. Esimerkiksi Helsingin rautatieaseman perustukset valettiin betonista seossuhteella 1:5:7 ja muut rautabetonirakenteet seossuhteella 1:3:2¹²⁵. Myös vuoden 1922 oppaan mukaan paras seossuhde teräsbetonirakenteille oli 1:3:3¹²⁶. Näiden tietojen perusteella historiallisten kantavien betonien sideainemäärä oli yleensä 200–350 kg/m³. Verrattaessa moderneihin betoneihin, joiden sideainemäärä on keskimäärin 300–400 kg/m³, historiallisten kantavien betonien sideainepitoisuus oli pienempi.

3.5 Vesi-sideainesuhde

Vesi-sideainesuhde on yksi tärkeimmistä betonin laatuparametreista. Veden määrällä on suuri vaikutus betonin lujuus-, muodonmuutos- sekä säilyvyysominaisuuksiin.¹²⁷ Jos vesi-sideainesuhde on alhainen, betoniin jää hydratoimattomia sideainepartikkeleita¹²⁸. Tieto vesi-sideainesuhteen vaikutuksesta betonin ominaisuuksiin saavutti rakennusalan vasta vuoden 1918 jälkeen betonitutkijan Duff A. Abrams ansiosta¹²⁹. Suomessa vesi-sideaineen vaikutusta betoniin ominaisuuksiin tutkittiin perusteellisesti vasta vuonna 1924 Paraisten sementtitehtaan laboratorioissa¹³⁰.

¹¹⁹ Nykänen 1951, 7

¹²⁰ Nykänen 1911, 9

¹²¹ esim. Asp 1908, 109; Hurme ym. 1991, 14 tai Geitlin & Troupp 1924, 6

¹²² esim. Asp 1908, 108

¹²³ Ahlberg 2012, 307 ja Gottgetreu 1881, 324–325

¹²⁴ esim. Asp 1908, 108

¹²⁵ Teknillinen aikakausilehti 1914/5-6, 109–121

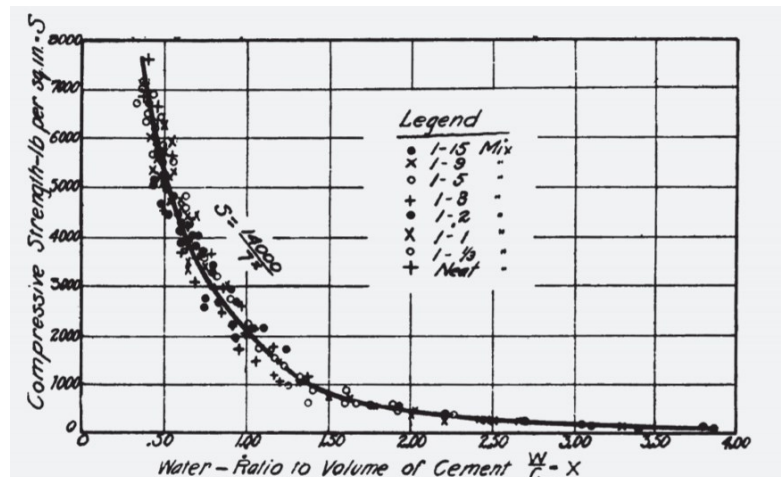
¹²⁶ Hurme ym. 1991, 18

¹²⁷ Punkki & Ojala 2018, 78

¹²⁸ Suomen Betoniyhdistys ry. 2018, 81

¹²⁹ Hurme ym. 1991, 19

¹³⁰ Geitlin & Troupp 1924



Kuva 18. Abrams kehitti vesi-sementtisuhdetta 1900-luvun alussa ja osoitti kokeellisesti sen ja betonin puristuslujuuden välisen riippuvuuden (Abrams 1919, 3)

1800-luvun loppupuolella ja 1900-luvun alussa vesi-sideainesuhde on voinut olla välillä 0,4-0,9 betonirakentamisoppaiden tietojen mukaan¹³¹, kuitenkin vettä lisättiin yleensä enemmän kuin nykyään paremman työstävyyden saavuttamiseksi¹³². Suuri vedenmäärä paransi betonin notkeutta, mutta samalla hydrataatioreaktiosta jäi ylimääräistä vettä, mikä aiheutti ylimääräisten kapillaarihuokosten muodostamista. Kapillaarihuokosten suuri määrä alensi betonin lujuutta ja heikensi pakkasenkestävyyttä.¹³³

1800-luvun loppupuolen ja 1900-luvun alkupuolen betonirakentamisen oppaissa veden määrää ilmoitettiin usein aistinvaraisesti pääosin tuoreen betonin kosteuslaatuna vesi-sideainesuhteen sijan, mikä johti suureen betonin laadun vaihteluun. Vuoden 1922 betonirakentamisen oppaassa mainittiin neljä kosteustasoa: kuiva, kostea, pehmeä ja vetelä. Betonin kosteustasoa tarkistettiin muodostamalla tuoreesta massasta pallo. Jos palloa ei pystytty muodostamaan ja betonin pinnalle puristamalla ei tullut yhtään vettä, betonia kutsuttiin kuivaksi. Jos puristamalla palloa pinnalle tihkui vettä, betonia kutsuttiin kosteaksi tai maakosteaksi. Jos vesi puristui helposti betonipallosta, betonia kutsuttiin pehmeäksi. Silloin kun betonista ei pystytty muodostamaan palloa ja pinnalla oli paljon vettä, betonia kutsuttiin veteläksi. Jokaiselle betonin kosteustasolle oli oma käyttötarkoitus.¹³⁴

3.6 Vesi

Vesi on yksi betonin pääkomponenteista. Veden laadulla on vaikutusta betonin ominaisuuksiin samoin kun määrällä. Yleensä puhtaalta näyttävä vesi, joka ei haise eikä maistuu pahalle, sopii betoniin valmistukseen.¹³⁵ Nykyään vedenlaadun pitää olla standardin SFS-EN 1008 mukainen.¹³⁶ Veden laatuun kiinnitettiin huomiota jonkin verran todennäköisesti myös 1800-luvun lopussa ja 1900-luvun alussa, sillä vuoden 1908 betonirakentamisen oppaassa suositeltiin käyttämään puhdasta vettä, joka ei sisältäisi betonin kovettumiselle haitallisia aineita. Suo- ja merivesi olivat oppaan kirjailijan mukaan kelvottomia betonin valmistukseen.¹³⁷

¹³¹ Hellebois ym. 2013, 152 ja Hurme ym. 1991, 14

¹³² Hellebois ym. 2013, 152

¹³³ Suomen Betoniyhdistys ry. 2018, 84

¹³⁴ Maunuvaara 1922, 13–14

¹³⁵ Suomen Betoniyhdistys ry. 2018, 59

¹³⁶ Suomen Betoniyhdistys ry. 2016, 29

¹³⁷ Asp 1908, 107

Vuoden 1908 veden laadun ohjeisiin verrattuna laajempia ohjeita esitettiin vuoden 1913 betonirakentamisen oppaassa. Betonin valmistukseen ohjeistettiin käyttämään puhdasta johto-, kaivo-, tai sadevettä. Myös oppaan kirjailijan mukaan puhdas joki- tai järvivesi olivat kelpoisia. Oppaassa ei kuitenkaan mainittu miten joki- tai järvivettä kuuluisi puhdistaa mahdollisista haitallisista aineista, kuten esimerkiksi pieneliöistä. Öljynjämää, rasvoja ja happeja sisältävää tehdasvettä ei suositeltu käyttämään betonin valmistukseen. Tämän sijaan meriveden käyttö oli Nykäsen mukaan mahdollista ylimääräisten suolan poistamisen jälkeen. Ohjeita tämän prosessin suorittamiseen oppaassa ei annettu.¹³⁸

Haitallisten aineiden poistamisen ohjeistuksen puutteesta voidaan päätellä, että ennen vuotta 1930 betonirakentamiseen käytetty vesi on voinut heikentää betonin ominaisuuksia. Ulkomaalaiset historiallisten betonien tutkimukset todistavat ainakin suolaisen meriveden käyttöä¹³⁹. Meriveden suuri suolapitoisuus heikentää betonin lujuutta ja pakkasenkestävyyttä, sekä edistää betoniterästen korroosiota¹⁴⁰.

3.7 Koriste-elementtien valmistustekniikka

1800-luvun lopussa syntyi menetelmiä teolliseen betonituotteiden sarjavalmistukseen monissa Euroopan maissa kuten myös Suomessakin. Sementtivalimot valmistivat betonista paljon julkisivun veistoksia, porrasaskelmia, listoja ja lattialaattoja. 1900-luvun alussa alettiin betonista valmistaa sarjatuotannolla myös tavanomaisempia rakennneosia kuten kattotiliä, betoniputkia, sekä muuri- ja katukiviä.

Ensimmäiset betonikoristeet 1880-luvulla olivat tuontituotteita Euroopasta kuten Ateneumin karyatidi-veistokset. Myöhemmin suurin osa koriste-elementeistä valmistettiin paikallisissa sementtivalimoissa.¹⁴¹ Esimerkiksi Helsingin sementtivalimo valmisti Johanneksen kirkon julkisivun betoniveistokset vuosina 1888–1891¹⁴².



Kuva 19. Betonisten koriste-elementtien esimerkit Suomessa: 1) Ateneumin karyatidi-veistokset, 2) Kansallisarkiston balusterikaiteen osa, 3) Kansalliskirjaston muusa-veistos ja 4) Johanneksen kirkon peto-veistos.

Vuoteen 1930 mennessä Suomessa esivalmistettujen betonisten koriste-elementtien määrä oli huomattava. Yllämainittujen tunnetuimpien esimerkkien lisäksi Helsingissä sijaitsevat mm. arkkitehdin Theodor Höijerin suunnitteleman Helsingin paloaseman julkisivun viisteiset betonidetaljit, Kansalliskirjaston julkisivukoristeet, Helsingin kasvitieteellisen puutarhan balusterikaide ja Kansallisarkiston balusterikaide. Betonikoristeet eivät esiinny pelkästään Helsingin katukuvassa; esimerkiksi Turun keskustassa sijaitsevat Suomen Pankin, Turun Säästöpankin ja Kansallisen kirjakaupan rakennuksien julkisivuja koristelevat betonipatsaat.

¹³⁸ Nykänen 1913, 13

¹³⁹ Urquhart 2013, 15

¹⁴⁰ Suomen Betoniyhdistys ry. 2018

¹⁴¹ Ahlberg 2012, 103

¹⁴² Pyykkö 1992, 51

Betonin valmistus tapahtui yleensä yksinkertaisissa valuhalleissa, joiden lähellä oli myös raaka-aineiden varastot¹⁴³. Valumuotit valmistettiin kipsistä, puusta, liimasta, hiekasta tai metallista. Materiaalin valintaan vaikutti sekä koristeiden muodon monimutkaisuus että valukertojen määrä. Sileän betonipinnan ja helpon irrotettavuuden saavuttamiseksi muotien sisäpintaa käsiteltiin useaan kertaan vernissalla tai sellakalla.¹⁴⁴ Käsittelyllä vähennettiin myös muotien kykyä imeä vettä betonista¹⁴⁵.

Saksassa suurimassa sementtivalimoissa oli 1800-luvun loppupuolella muotien koneellinen valmistus, mutta pääosin muotit valmistettiin käsin. Sen takia valumuotien valmistushinta oli melko korkea ja niitä varastoitiin mahdollista jatkokäyttöä varten. Korkean valmistuskustannuksen seurauksena ympäri Eurooppaa löytyy samanlaisia betonikoristeita.



Kuva 20. 1900-luvun alussa erikoiset betoniveistokset valmistivat kuvanveistäjät omissa ateljeissaan. Kuvassa on kuvanveistäjä Walter Runeberg tekemässä Kansalliskirjaston Rotunda-rakennuksen julkisivun veistoksia. (Winterhalter ym. 2014, 46)

Yksittäiset, erityisesti muotoillut betoniveistokset ja -koristeet todennäköisimmin valettiin taiteilijoiden ateljeissa samalla menetelmällä kuin kipsiveistokset ja -koristeet jo vuosisatoja aikaisemmin.¹⁴⁶ Esimerkkinä on esitetty kuvassa 20 Kansalliskirjaston Rotunda-rakennuksen muusa-patsaiden valmistus Walter Runeberg ateljeessa 1900-luvun alussa.

1800-luvun loppupuolella koriste-elementtejä valmistettiin pääosin maakosteasta betonista, jonka vesi-sideainesuhde oli 0,2 - 0,3. Ensin maakostea betonimassa iskettiin ja tiivistettiin valumuotteihin pintakerrokseksi. Aluksi tiivistys tehtiin käsin ja myöhemmin pneumaattisilla työkaluilla ilmakuplien poistamiseksi.¹⁴⁷ Esimerkiksi Johanneksen kirkon betonipatsaiden pintakerroksen paksuus on noin 30–40 mm. Pintavalun jälkeen keskiosan betonimassa kaadettiin muotiin, eikä sitä tiivistetty voimakkaasti. Tämän johdosta koriste-elementtien keskiosan betoni oli huokoisempaa verrattuna pintabetoniin. Tämän takia veis-

¹⁴³ Ahlberg 2012, 106

¹⁴⁴ Halonen 2001, 99-103

¹⁴⁵ Ahlberg 2012, 104

¹⁴⁶ Ahlberg 2012, 104

¹⁴⁷ Halonen 2001, 11, 25–26, 90 ja Ahlberg 2012, 307

toksissa voi esiintyä valuvirheitä ja vesitaskuja.¹⁴⁸ Kovettumisen aikana betonikoristeet pidettiin kosteina tai jopa vedessä. Syynä tähän oli se, että sideaine sitoutui vedessä hitaammin kuin ilmassa, jolloin halkeamien syntyä saatiin kontrolloitua.¹⁴⁹

Koriste-elementeissä raudoitusten käyttö oli harvinaista ja epäsäännöllistä. Yleensä käytettiin litteätä valurautaa. Pyöreätä valurautaa käytettiin vain koristeiden liitos- ja kiinnityskohdissa.¹⁵⁰ Koska raudoitusten korroosio aiheuttaa huomattavia vaurioita betonille ajan myötä, raudoitusten vähäinen määrä tai kokonainen puute paransivat koriste-elementtien säilyvyyttä pitkän ajan perspektiivissä¹⁵¹.

¹⁴⁸ Halonen 2001, 11, 25–26

¹⁴⁹ Halonen 2001, 90 ja Ahlberg 2012, 307

¹⁵⁰ Halonen 2001, 27

¹⁵¹ Ahlberg 2012, 307

4 Historiallisten betonien mikrorakenne ja -koostumus

Tässä luvussa käsitellään lyhyesti historiallisten betonien mikrorakennetta ja sen vaikutusta betonin ominaisuuksiin. NykYTEknologiat mahdollistavat sideaineesta ja kiviainesta hienoimpien rakenteiden ja aineosien tutkimista, suurusluokaltaan jopa 1 nm tarkkuudella. Tällaisissa tutkimuksissa saadaan lisätietoja betonin ominaisuuksista ja niiden takana olevista mekanismeista.¹⁵² Betonien mikrorakenteen avulla pystymme ymmärtämään ja selittämään historiallisten ja modernien betonien välisten erojen syitä.

4.1 Sideaineiden mineraloginen koostumus

Käsitteellään ensin modernien sementtien kemiallisia valmistumisreaktioita. Sementin tärkein osa-aine on portlandklinkkeri, jota valmistetaan kalkkikiven ja saven tai liuskekiven seoksesta. Modernin sementin lajista riippuen perusseokseen voidaan lisätä eri määriä erilaisia seosaineita. Valmista seosta kuumennetaan noin 1450 °C:een, minkä lopputuotteena muodostuu sementtiklinkkeri.¹⁵³ Sementtiklinkkerin valmistumisreaktiotyypit voidaan jakaa kolmeen vaiheeseen, jotka on esitetty kuvassa 21 ja alla.

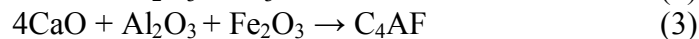
I. Ensimmäisessä vaiheessa tapahtuvat alle 1260¹⁵⁴ °C:en sementin valmistusreaktiot, joista tärkeimmät ovat

a) kalsinointi eli kalsiitin (kalsiumkarbonaatin CaCO₃) hajoaminen kalkioksidiksi (CaO) ja hiilidioksidiksi (CO₂):



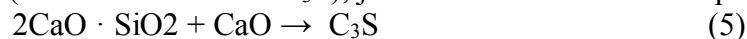
b) savimineraalien hajoaminen,

c) aluminaatin (C₃A), ferriitin (C₄AF) ja beliitin (dikalsiumsilikaatin C₂S), muodostaminen savimineraalien hajoamistuotteista:



Tämän vaiheen tärkeimmät tuotteet ovat beliitti, kalkkioksidi, aluminaatti ja ferriitti. Reaktion loppuvaiheessa pieni osa aluminaattia ja ferriittia muuttavat olomuotonsa nestemäiseksi.¹⁵⁵

II. Toisessa vaiheessa tapahtuvat 1260¹⁵⁶–1450 °C:iden sementin valmistusreaktiot. Tässä vaiheessa tapahtuu klinkkerin muodostuminen sintraantumalla. Sintraantumisella tarkoitetaan kiinteän materiaalin muodostamista jauhemaisista raaka-aineista kuumentamalla tai puristamalla ilman sulamispisteen saavuttamista. Lämpötilassa 1450 °C noin 20–30 % aluminaattia ja ferriittia sulavat nestemäiseksi. Suuri osa beliittiä ja lähes kaikki kalkkioksidi reagoivat keskenään muodostaen aliittia (trikalsiumsilikaattia C₃S), joka on modernin sementin päämineraali.¹⁵⁷



III. Kolmannessa vaiheessa tapahtuvat jäähtyksen aikaiset sementin valmistusreaktiot. Pääosin aluminaatti ja ferriitti kiinteytyvät nestemäisestä muodosta. Lisäksi

¹⁵² Heikkinen & Konow 1992, 6

¹⁵³ Suomen Betoniyhdistys ry. 2018, 24–29

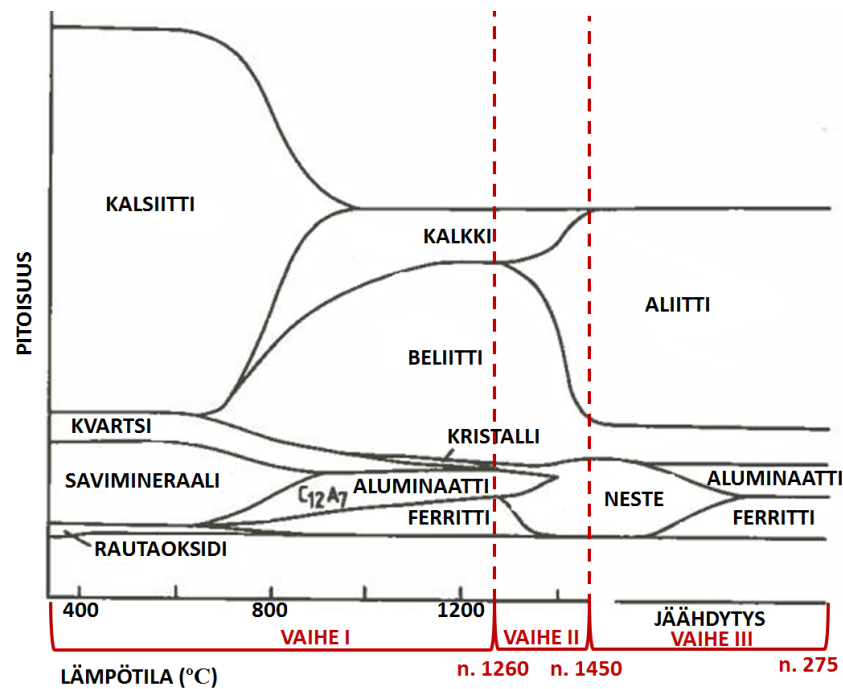
¹⁵⁴ Brocklebank 2006

¹⁵⁵ Taylor 1997, 55–59

¹⁵⁶ Brocklebank 2006

¹⁵⁷ Taylor 1997, 55–59

tapahtuvat aliitin ja beliitin polymorfiset siirtymät.¹⁵⁸ Sementtiklinkkeriä jäähdytetään noin 275 °C:een¹⁵⁹.



Kuva 21. Kuvassa on esitetty portlandklinkkerin komponenttien pitoisuuksien ja polttolämpötilan riippuvuus. Sementin tärkeimmät mineraalit ovat beliitti ja aliitti. Beliitti muodostuu välillä noin 700–1200 °C. Polttolämpötilan noustessa yli noin 1260 °C osa beliittiä ja kalkkioksidi reagoivat keskenään muodostaen aliittia (Taylor 1997, 56 mukaan).

Historiallisen portlandsementin valmistusteknologiassa ei ole paljon eroja modernin portlandsementin valmistusteknologiaan verrattuna. Polttouunien kehityksen johdosta, joka on tarkemmin esitetty luvussa 3.1.2, vaiheen III reaktiot voi esiintyä vain osittain. Tämä johti alhaisempaan aliitin pitoisuuteen ja korkeampaan beliitin pitoisuuteen kuin moderneissa sementeissä.¹⁶⁰ Aliitin pitoisuus moderneissa sementeissä on noin 60 % ja beliitin pitoisuus noin 10 – 15 %.¹⁶¹ Historiallisessa portlandsementissä tutkimusten mukaan aliitin pitoisuus on alle 60 %¹⁶².

Hydraulisen kalkin, luonnonsementin ja varhaisen keinotekoisen sementin polttolämpötila on pääosin alle 1300 °C. Tämän takia näiden sideaineiden valmistuksessa vaiheen II reaktiot esiintyvät vain osittain. Tämän johdosta hydraulisen kalkin, luonnonsementin ja varhaisen keinotekoisen sementin mineralogisessa koostumuksessa esiintyy kalsiumsilikaateista pääosin vain beliitti. Aliitin pitoisuus näissä sideaineissa on huomattavasti pienempi verrattuna historialliseen portlandsementtiin ja moderneihin sementteihin.¹⁶³ Pieni aliitin pitoisuus voi esiintyä myös sideaineissa, jotka poltettiin alle aliitin muodostamislämpötilan (yli 1260 °C). 1800-luvun uuneissa lämpötila jakautui epätasaisesti uunin sisällä. Tämän takia syntyi kuumia alueita, joissa lämpötila on voinut olla yli aliitin muodostumislämpötilan.¹⁶⁴

¹⁵⁸ Taylor 1997, 55–59

¹⁵⁹ Suomen Betoniyhdistys ry. 2018, 25

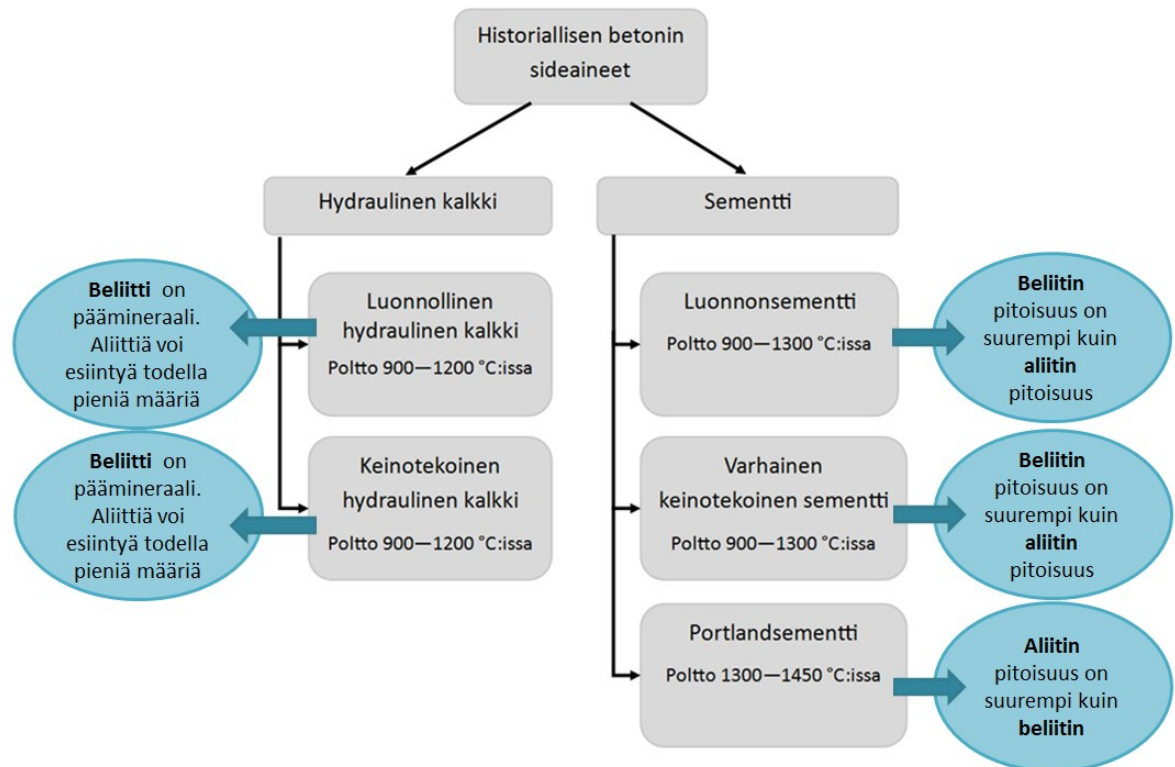
¹⁶⁰ esim. Brocklebank 2006 ja Konow 2006

¹⁶¹ Suomen Betoniyhdistys ry. 2018, 25

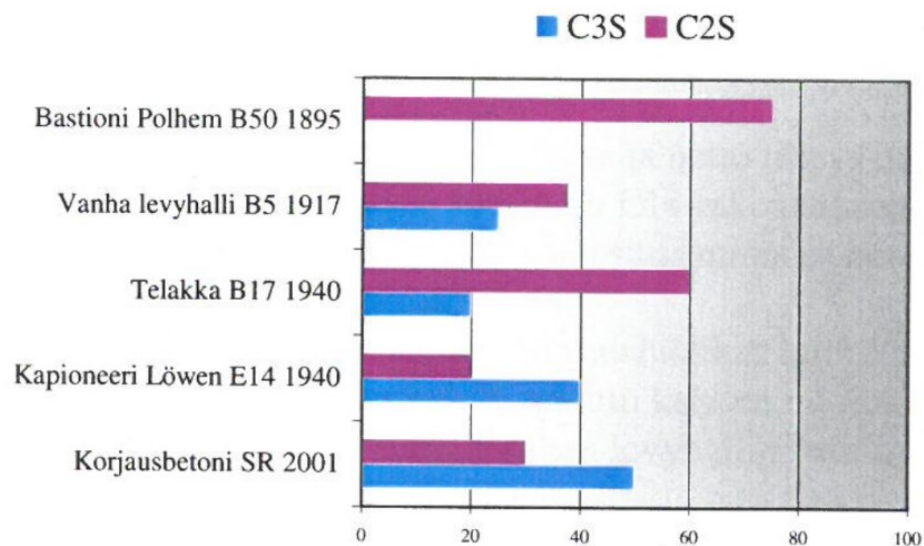
¹⁶² esim. Konow 2004, 13

¹⁶³ esim. Brocklebank 2006, Konow 2006, Callebaut ym. 2000 ja Hughes ym. 2007

¹⁶⁴ Callebaut ym. 2000, 398



Kuva 22. Historiallisten sideaineiden valmistusteknologioiden johdosta sideaineiden mineralogisessa koostumuksessa esiintyy kalsiumsilikaateista pääosin vain beliitti. Aliittia esiintyy historiallisissa sideaineissa vähemmän kuin moderneissa sementeissä

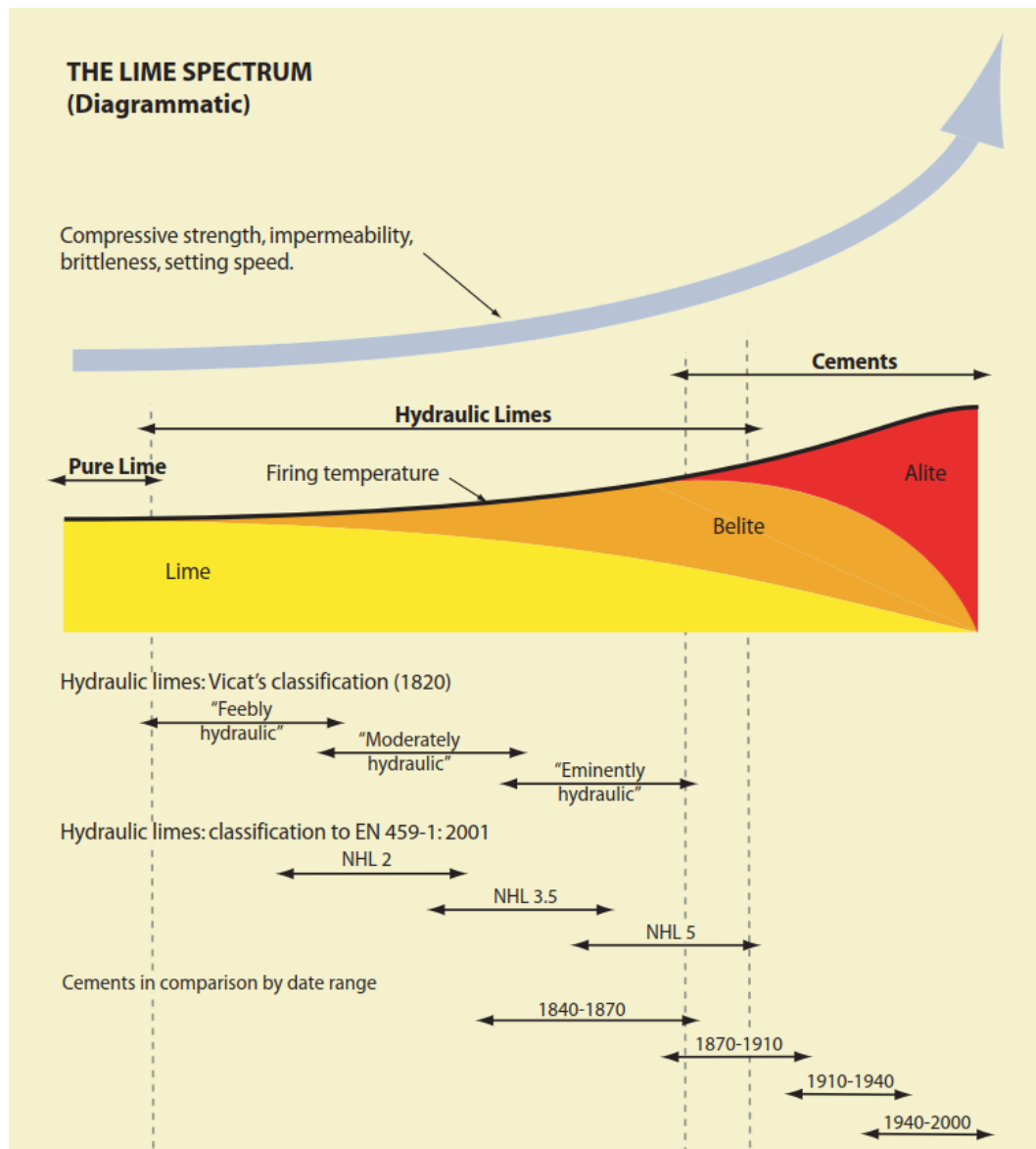


Kuva 23. Kuvassa on esitetty Suomenlinnan historiallisten betonien tutkimuksen tulokset. Tutkimustulokset osoittavat sen, että beliitin pitoisuus historiallisissa betoneissa on huomattavasti suurempi kuin moderneissa betoneissa. Modernien betonien esimerkkinä tutkimuksessa on käytetty korjausbetoni SR:ää (Konow 2004, 13).

Von Konovin¹⁶⁵ Suomenlinnan historiallisten betonien tutkimukset osoittavat, että beliitin pitoisuus betonin sideaineissa on laskenut vuodesta 1895 vuoteen 2001 verrattuna ja aliitin pitoisuus vastaavasti on kasvanut. Tutkimustulokset on esitetty kuvassa 23. Tutkimustu-

¹⁶⁵ Konow 2004, 13

loksista voidaan myös huomata, että vielä vuonna 1940 käytettiin muita sideainelajeja kuin portlandsementti betonin valmistuksessa (esimerkiksi Telakan B17 betoninäyte).



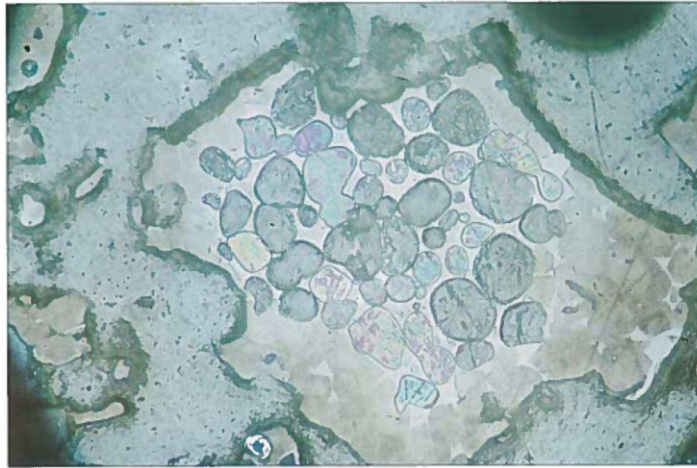
Kuva 24. Betonien ja laastien sideaineiden käytön aikana oli laaja valikoima erilaisia hydraulisia kalkkeja (hydraulic limes) ja sementtejä (cements). Sideaineille on tunnusomaista beliitin (belite), aliitin (alite), ja vapaan kalkin (lime) pitoisuuksien vaihtelu (Brocklebank 2006).

Brocklebank¹⁶⁶ esitti lajittelua hydrauliseksi kalkiksi ja sementiksi beliitin ja aliitin pitoisuuksien perustella (kuva 24). Tämän lajittelun mukaan ale 10 % aliittia sisältävät sideaineet voidaan luokitella sekä hydrauliseksi kalkiksi että sementiksi. Tässä tilanteessa hydraulisen kalkin indikaattorina voi olla kalsiumhydroksidin ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) esiintyminen. Hydraulisessa kalkissa jäljellä on tietty määrä vapaata kalkkia (CaO), joka muuttuu vapaaksi kalsiumhydroksidiksi ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) sammutuksen jälkeen. Kaikissa sementtilajeissa vapaan kalkin (CaO) pitoisuus on huomattavasti pienempi, joten sementtejä ei pystytä sammuttamaan valmistusprosessissa. Sammutuksen kemiallinen reaktio voidaan esittää seuraavasti:¹⁶⁷

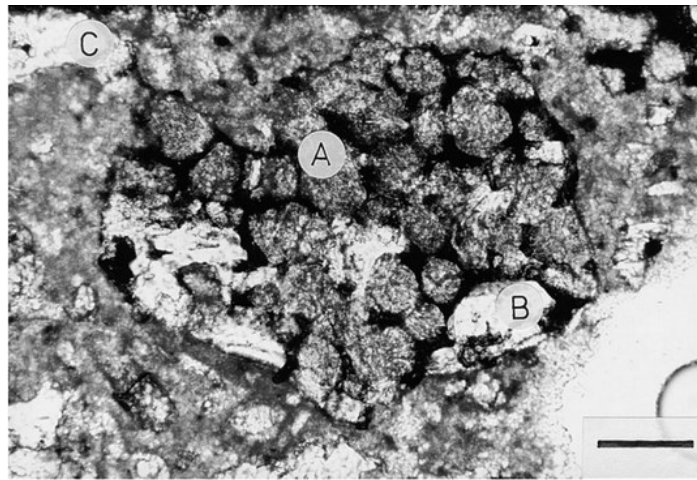


¹⁶⁶ Brocklebank 2006

¹⁶⁷ Konow 2006, 16–20



Kuva 25. Vapaan kalkin (CaO) pitoisuus sementeissä on huomattavasti pienempi kuin hydraulissa kalkeissa. Mikroskooppikuvan pidemmän sivuun pituus on 0,6 mm (Jonh ym. 1998).



Kuva 26. Historiallisissa sideaineissa beliitin pitoisuus on usein suurempi kuin aliitin pitoisuus. Kalsiumsilikaatit eroavat toisistaan rakeiden muodolta: beliitin (A) rakeet ovat pyöristettyjä ja aliitin (B) rakeet ovat kulmikkaita. Kuvassa on oletettavasti 1800-luvun hydraulisen hydratoimaton kalkkipartikkeli. Mittaviiva on 0,067mm (Callebaut ym. 2000, 399).

Historiallisen sideaineiden mineralogisessa koostumuksessa aliitin ja beliitin pitoisuuksien vaihtelu lisäksi on muitakin eroja, joiden tunnistamisesta voi olla hyötyä korjauskohteen sideainetyypin arvioinnissa. Kalsiumsilikaattien vaikutus sideaineen ominaisuuksiin on kuitenkin kaikista suurin. Aliitin ja beliitin pitoisuuksien määrittäminen pitää huomioida, että aliitti reagoi nopeammin veden kanssa kuin beliitti. Tästä syystä hydratoimattomien aliitti- ja beliittipartikkelin määrät voivat olla vääristyneet, kun niitä mitoitetaan kovettuneesta betonista.¹⁶⁸

Hydraulinen kalkki, luonnonsementti ja varhainen keinotekoinen sementti sisältävät yleensä gehleniittiä (C_2AS), joka muodostuu alle 1200 °C lämpötilassa. Gehleniitin esiintymistä sideaineessa voidaan käyttää alhaisemman polttolämpötilan indikaattorina historiallisia sideaineita tutkiessa. Hydrauliset kalkit, luonnonsementit ja varhaiset keinotekoiset sementit voivat sisältää kvartsiittia ja kalsiittia, jotka eivät hajoineet loppuun vaiheessa I¹⁶⁹. Lisäksi hydraulinen kalkki sisältää pienempiä määriä alumiinioksidia (Al_2O_3) ja rautaoksidia (Fe_2O_3) kuin sementti.¹⁷⁰

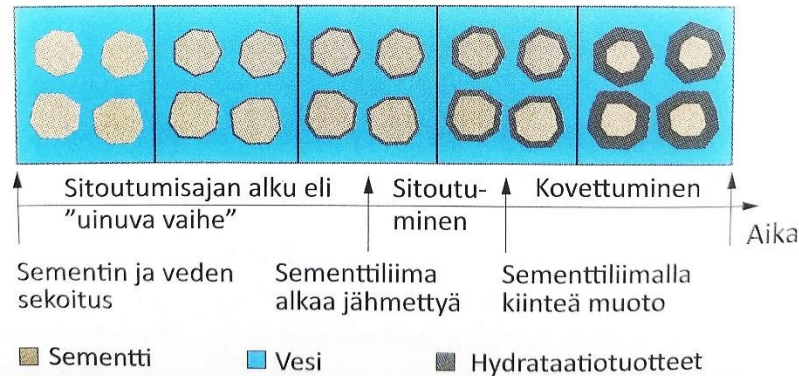
¹⁶⁸ Callebaut ym. 2000, 398 ja Koskinen 2019a

¹⁶⁹ Hughes ym. 2007, 25–26 ja Callebaut ym. 2000, 398

¹⁷⁰ Callebaut ym. 2000, 398

4.2 Betonien hydrataatioreaktiot

Betonin osa-aineet reagoivat veden kanssa muodostaen betonia. Tätä reaktiota kutsutaan hydrataatioksi. Hydrataatioreaktiot jaetaan kolmeen vaiheeseen: sitoutumisajan alku, sitoutuminen ja kovettuminen.¹⁷¹ Sementin hydrataation vaiheet ajanfunktiona on esitetty kuvassa 27.



Kuva 27. Modernin sementin hydrataation vaiheet ajanfunktiona (Suomen Betoniyhdistys ry. 2018, 36).

Sitoutumisajan alku -vaihe alkaa heti veden lisäämisen jälkeen. Tässä vaiheessa sideainehiukkasten pinnasta liukenee veteen mineraaleja ja sideainehiukkasten ympärillä alkaa syntyä hydrataatiotuotteita. Sitoutumisajan alku -vaiheen aikana massaa pystyy työstämään.¹⁷²

Betonimassan tietyn jäykkyyden saavuttamisen jälkeen alkaa sitoutumisen vaihe. Tämän vaiheen aikana hydrataatiotuotteet kiinnittyvät hydraattiverkostoon. Vahvojen liitosten muodostamiseksi betonia ei saa häiritä sekoittamalla tai muovaamalla. Sitoutumisaika riippuu sideaineen kemiallisesta koostumuksesta ja sen hienojakoisuudesta.¹⁷³

Selvää rajaa sitoutumisen ja kovettumisen vaiheiden välillä ei ole. Kovettumisen vaiheen aikana hydraattiverkoston liitosten vahvistuminen jatkuu, minkä seurauksena betoni lujittuu. Kovettumisen vaihe jatkuu niin kauan kuin reagoimatonta sideainetta ja vapaata vettä riittää ja ne pääsevät reagoimaan keskenään.¹⁷⁴

Sideaineiden mineralogiset komponentit reagoivat eri tavoin veden kanssa betonin hydrataatioreaktiossa. tästä johtuen sideaineiden mineralogisen koostumuksen vaihtelu vaikutti historiallisten betonien ominaisuuksiin. Historiallisen sideaineiden mineralogista koostumusta tarkasteltiin luvussa 4.1 ja yleisempien mineralogisten komponenttien ominaisuudet on esitetty taulukossa 2.

¹⁷¹ Suomen Betoniyhdistys ry. 2018, 35–37

¹⁷² Suomen Betoniyhdistys ry. 2018, 35–37

¹⁷³ Suomen Betoniyhdistys ry. 2018, 35–37

¹⁷⁴ Suomen Betoniyhdistys ry. 2018, 35–37

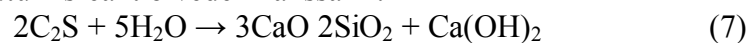
Taulukko 2. Sideaineiden yleiset mineralogiset komponentit ja niiden ominaisuudet. Historiallisen sideaineiden mineralogisen koostumuksen vaihtelulla on suuri vaikutus betonien ominaisuuksiin (Suomen Betoniyhdistys ry. 2018, 28).

Klinkkeri	
Trikalsiumsilikaatti (C ₃ S) 3 CaO · SiO ₂	Nopea lujuudenkehitys, suuri loppulujuus, korkea hydrataatiolämpö (500 kJ/kg), sulfaatinkestävä.
Dikalsiumsilikaatti (C ₂ S) 2 CaO · SiO ₂	Hidas lujuudenkehitys, suuri loppulujuus, alhainen hydrataatiolämpö (250 kJ/kg), sulfaatinkestävä.
Trikalsiumaluminaatti (C ₃ A) 3 CaO · Al ₂ O ₃	Suuri reagointinopeus ja vedentarve, pieni loppulujuus ja erittäin korkea hydrataatiolämpö (1340 kJ/kg), ei sulfaatinkestävä.
Tetrakalsiumaluminaattiferriitti (C ₄ AF) 4 CaO · Al ₂ O ₃ · Fe ₂ O ₃	Hidas lujuudenkehitys, pieni loppulujuus, korkea hydrataatiolämpö (420 kJ/kg), sulfaatinkestävä.
Vapaa kalkki CaO _{vap}	Reagoi nopeasti veden kanssa kalsiumhydroksidiksi, Ca(OH) ₂ . Korkea pitoisuus voi aiheuttaa nopeamman sitoutumisen ja tuotteen paisumisen.
Magnesiumoksidi MgO	Reagoi hitaasti veden kanssa magnesiumhydroksidiksi, Mg(OH) ₂ . Korkea pitoisuus voi tällöin ajan mittaan aiheuttaa lopputuotteessa paisumista ja halkeamista.
Alkaliyhdisteitä	Alkaliyhdisteet nopeuttavat hydrataatioreaktioita, nostavat hieman alkulujuustasoa ja laskevat vastaavasti loppulujuustasoa.

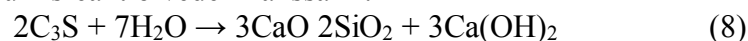
Betonin sideaineiden mineraaleista aluminaattiyhdisteet (C₃A ja C₄AF) reagoivat ensimmäisinä veden lisäyksen jälkeen. Näitä reaktioita hidastetaan yleensä lisäämällä kipsiä, joka antaa betonille sopivan työstöajan. Aluminaattiyhdisteiden reaktiot eivät vaikuta paljon betonin ominaisuuksien kehitykseen. Sen sijaan kalsiumsilikaatit, beliitti ja aliitti, vastaavat betonin ominaisuuksien kehityksestä, joista tärkein on lujuuden kehitys.¹⁷⁵

Aliitti reagoi nopeasti veden kanssa ja reaktiossa muodostuu paljon kalsiumhydroksidia. Beliitti reagoi huomattavasti hitaammin kuin aliitti ja kalsiumhydroksidia muodostuu vähemmän.¹⁷⁶ Aliittisarja saavuttaa lujuutensa jo 28 päivän iässä. Beliittisarjan lujuuden saaminen kestää vastaavasti noin 90 vuorokautta tai kauemmin.¹⁷⁷ Kalsiumsilikaattien sitoutumisreaktiot on esitetty alla.

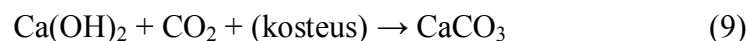
Beliitin sitoutumisreaktio veden kanssa¹⁷⁸:



Aliitin sitoutumisreaktio veden kanssa¹⁷⁹:



Hydraulisen kalkin kovettumisessa on otettava huomioon myös kalkin karbonatisoitumista ilmassa. Tämä prosessi kestää vuosia ja parantaa betonin lujuutta.¹⁸⁰ Kalkin kovettumisen reaktio¹⁸¹:



¹⁷⁵ Suomen Betoniyhdistys ry. 2018, 28 ja 35

¹⁷⁶ Konow 2006, 19

¹⁷⁷ Brocklebank 2006

¹⁷⁸ Konow 2006, 21

¹⁷⁹ Konow 2006, 21

¹⁸⁰ Brocklebank 2006

¹⁸¹ Konow 2006, 14

Historiallisessa portlandsementissä beliitin ja aliitin pitoisuudet voivat vaihdella valmistusteknologiasta riippuen. Kun aliitin osuus on alhainen, seos on hyvin notkea ja kovettuu hitaasti. Suurempi aliitin pitoisuus aiheuttaa nopeamman lujuuden kehittymisen ja suuremman loppulujuuden. Tämä kuitenkin huonontaa betonimassan notkeutta.¹⁸²

Hydraulisen kalkin, luonnonsementin ja varhaisen keinotekoisien sementin mineralisissa koostumuksissa esiintyy kalsiumsilikaateista pääosin vain beliitti. Aliitin pitoisuus on valmistusprosessin takia näissä sideaineissa pieni ja sen vaikutus betonin ominaisuuksiin on vähäinen. Tämän takia betonin loppuominaisuuksien saavuttaminen on hitaampaa ja loppulujuus on alhaisempi.¹⁸³

4.3 Sideaineiden klinkkerirakeiden raekoot

Sideaineen klinkkerirakeiden raekoko vaikuttaa betonin sitoutumisreaktion nopeuteen, hydrataationopeuteen, lujuudenkehitykseen, lämmöntuottoon ja vedentarpeeseen. Historiallisten sideaineiden raekoko oli huomattavasti suurempi kuin modernin sementin. Miten suurempi sideaineen raekoko on, sitä pienempi on reaktiopinta-ala, mikä hidastaa hydrataatioreaktioita sekä pienentää vedentarvetta.¹⁸⁴ Tämän lisäksi suurikokoiset rakeet reagoivat joskus vain pinnasta, minkä johdosta osa sementtipartikkeleista jää betoniin reagoimattomina.¹⁸⁵

1800-luvulla ja myös 1900-luvun alussa sementin hienoutta mitattiin seulomalla sitä tiheän seulan läpi. Seulan tiheys ilmoitettiin yleensä reikien määrällä per pinta-alan yksikkö. Britanniassa vuonna 1879 julkaistun betonirakentamisen oppaan mukaan sementin hienoutta mitattiin seuloilla, joissa oli 2500 reikää per 1 neliötuuma ($6,4516 \text{ cm}^2$). Sallittu läpäisyarvo oli 10 %.¹⁸⁶ Toisin sanottuna vuoden 1879 suosituksen mukaan 10 % sideaineen klinkkerirakeista voisi olla läpimitalta yli 0,6 mm. Belgiassa vuonna 1904 suosituksen mukaan ainoastaan 5 % klinkkerirakeista voisi olla halkaisijalta yli 0,2 mm.¹⁸⁷

Suomessa vuonna 1911 julkaistun Nykäsen¹⁸⁸ betonirakentamisen oppaan mukaan sementtijäännös seulomisen jälkeen voisi olla korkeintaan 10 %. Käytössä oli seuloja, joissa oli 900 reikää per 1 cm^2 . Toisin sanoen 10 % klinkkerirakeista voisi olla läpimitalta yli 0,4 mm vuonna 1911. Lisäksi käytettiin seuloja, joissa oli 5000 reikää per 1 cm^2 . Tiheämmällä seulalla saavutettiin hienompaa sementtiä, jonka suurin klinkkerirake oli läpimitaltaan 0,2 mm.¹⁸⁹ Tiheämpään seulan sallitusta jäännöksestä tai käytön laajuudesta ei ole mainintaa Nykäsen kirjassa.

Vuonna 1922 julkaistun Mauniovaaran¹⁹⁰ betonirakentamisen oppaan mukaan sementin hienous määritettiin seuloilla, joissa oli 4900 reikää per 1 cm^2 . Tavallisen sementin sallittu läpäisyarvo oli 9,7 % ja hienon sementin sallittu läpäisyarvo oli 2,2 %. Toisin sanottuna vuoden 1822 suosituksen mukaan 9,7 % tavallisen sideaineen klinkkerirakeista voisi olla läpimitalta yli 0,2 mm. Tämän lisäksi hienon sideaineen klinkkerirakeista ainoastaan 2,2 % voisi olla läpimitalta yli 0,2 mm.

¹⁸² Brocklebank 2006

¹⁸³ Konow 2006, 19

¹⁸⁴ Suomen Betoniyhdistys ry. 2018, 38

¹⁸⁵ Konow 2006, 20

¹⁸⁶ Reid 1879, 50

¹⁸⁷ Hellebois ym. 2003,

¹⁸⁸ Nykänen 1911, 7

¹⁸⁹ Nykänen 1911, 7

¹⁹⁰ Muoniovaara 1922, 10

Kirjallisuuskatsauksen tulokset (taulukko 3) osoittavat, että sideaineiden klinkkereiden maksimiraekoot olivat muuttuneet vuoden 1879 arvosta 0,6 mm vuoden 1922 arvoon 0,2 mm. Belgiassa mainittiin kuitenkin sideaineen klinkkereiden maksimiraekokona arvo 0,2 mm jo vuonna 1904. Verrattuna modernin portlandsementin klinkkerin raekokoon, joka on keskimäärin 0,02 mm ja maksimissaan 0,09 mm¹⁹¹, historiallisten sideaineiden klinkkerien raekoot olivat huomattavasti suurempia. Historiallisten sideaineiden suuret klinkkeriraekoot johtivat sen ajan jauhatusteknologian puutteista¹⁹².

Sallittu maksimiraekoko laskettiin kaavalla:

$$2 * \sqrt{\frac{A}{n * \pi}},$$

missä A on pinta-ala ja n on seulan reikien määrä

Taulukko 3. Taulukossa on esitetty sallitun sideaineiden klinkkerien maksimiraekoon vaihtelua vuosina 1879–1922 kirjallisuuskatsauksen pohjalta. Sallitun sideaineiden klinkkerien maksimiraekoko on muuttunut 0,6 mm:sta 0,2 mm:iin.

VUOSI	SEULAN REIKIEN MÄÄRÄ	PINTA-ALA (MM ²)	SALLITTU MAX. RAEKOKO (MM)	JANOS (%)	SEMENTIN LAATU
1879	2500	645,16	0,6	10	TAVALLINEN
1904	-	-	0,2	5	TAVALLINEN
1911	900	100	0,4	10	TAVALLINEN
1911	5000	100	0,2	-	HIENO
1922	4900	100	0,2	9,7	TAVALLINEN
1922	4900	100	0,2	2,2	HIENO

Historiallisten betonien mikroskooppitutkimukset osoittavat, että historiallisten betonien klinkkeriraekoot ovat yleensä paljon suurempia verrattuna moderneihin betoneihin. Tuborg von Konov löysi suuria klinkkerirakeita läpimitaltaan jopa 0,5–0,9 mm tutkiessa Suomenlinnan betoninäytteitä.¹⁹³ Kolmen näytteiden tutkimustulokset on esitetty taulukossa 4. Vuoden 1887 betoninäytteissä oli vain 3–4 % klinkkerirakeista läpimitalta yli 0,1 mm. Tutkittavan betonin sideaine on hienompi kuin sen ajan normit olivat vaatineet.

Taulukko 4. Taulukossa on esitetty kolmen Suomeenlinnan betoninäytteiden klinkkeriraekokotutkimuksen tulosta. Suurempikokoisien kuin 0,1 mm klinkkerirakeiden määrä on ilmoitettu prosentteina (Konow 2005, 7 mukaan)

**suurin sallittu sideaineen
raekoko > 0,1 mm**

15%	1875
8%	1880
3-4%	1887

4.4 Kiviaineksen rakeisuusjakauma

Kiviainesjakauma vaikuttaa betonin ominaisuuksiin kuten lujuuteen, työstettävyyteen, karbonatisoitumiseen ja kutistumiseen. Kiviaineksen rakeisuus on kiviaineksen erisuuruisten rakeiden määrien painosuhde. Rakeisuuden määrittämiseksi käytetään seulontalaitteistoa.

¹⁹¹ Taylor 1997, 90

¹⁹² Konow 2006, 20

¹⁹³ Konow 2006, 20

Nykyjään mittaamista tehdään standardin SFS-EN 933-1 mukaisesti. Tulokset esitetään taulukkona tai kuvajana. Kiviainesta jaetaan raekoon mukaan käyttäen standardia SFS-EN 933-2 fillerikiviainekseksi, hienoksi kiviainekseksi, luonnon lajittamaksi 0/8 mm, koostekiviainekseksi ja karkeaksi kiviainekseksi.¹⁹⁴ Kiviaineksen luokittelu on esitetty taulukossa 5.

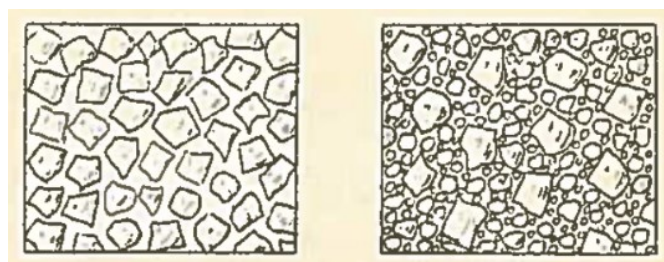
1900-luvun alun betonirakentamisen oppaissa kiviaineksen lajiteltiin kahteen päälajiin kiviainesrakeiden koon perustella: karkeaan, johon kuului sora ja sepeli, ja hienoon, johon kuului hiekka. Vuoden 1908 betonirakentamisen oppaassa Asp¹⁹⁵ määritteli hiekan jyvän läpimitan olevan korkeintaan 7 mm, soran olevan välillä 7–50 mm ja sepeli olevan välillä 50–70 mm.

Taulukko 5. Kiviaines jaetaan raekoon mukaan fillerikiviainekseksi, hienoksi kiviainekseksi, luonnon lajittamaksi 0/8 mm, koostekiviainekseksi ja karkeaksi kiviainekseksi. (Suomen Betoniyhdistys ry. 2018, 45)

Kiviainestuotteiden jaottelu	Raekoot [mm]
Fillerikiviaines	< 0,063
Hieno kiviaines	0/1, 0/2 tai 0/4
Luonnon lajittama 0/8	0/8
Koostekiviaines (sora- tai kalliomurske)	0/5, 0/6 tai 0/8
Karkea kiviaines	d/D (d < D, d ≥ 2; D ≥ 4)

1900-luvun alkupuolella kiviaineksen rakeisuusjakauman ja muodon vaikutusta betoniin ominaisuuksiin tunnettiin jonkin verran rakennusmiesten keskuudessa. Tästä tiedosta huolimatta yleisen käsitykseen mukaan historiallisten betonien valmistuksessa käytettiin pääosin karkeata kiviaineesta suuren kestävyys ja helpomman saattavuuden takia¹⁹⁶.

Suomenkielisessä vuoden 1913 betonirakentamisen oppaassa suositeltiin käyttämään erijyväistä hiekkaa ja soraa, koska sillä tavalla saatiin tiheämpää betonia kuin tasajyväisellä kiviaineksella (kuva 28). Nykänen mainitsi myös, että karkealla hiekalla saadaan lujempaa betonia, mutta valmistuksessa pitää käyttää enemmän sementtiä. Hienorakeinen hiekka vähentää lujuutta ja vaatii paljon vettä betonin valmistukseen.¹⁹⁷



Kuva 28. 1900-luvun alkupuolen betonirakentamisen kirjallisuudessa esitettiin kiviaineksen pakkaantumisteorian perusteita. Lujaa ja tiivistä betonia saadaan kiviaineksella, jossa on monenlaisia raekokoja. Silloin pienemmät rakeet täyttävät suurempien rakeiden välistä tilaa. Lisäksi sementin tarve pienenee (Nykänen 1913, 12)

¹⁹⁴ Suomen Betoniyhdistys ry. 2018, 45

¹⁹⁵ Asp 1908, 107

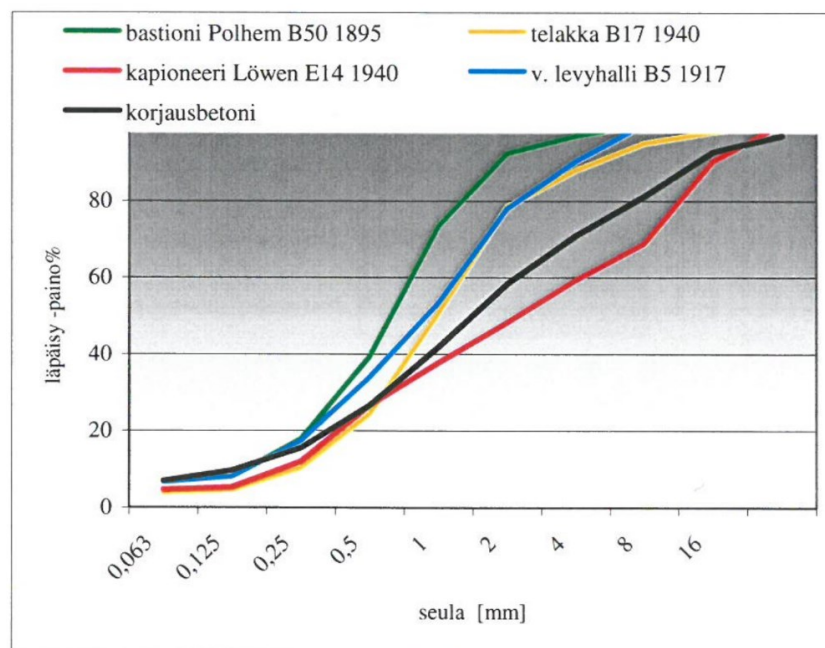
¹⁹⁶ Hellebois ym. 2003

¹⁹⁷ Nykänen 1913, 12

Vuoden 1922 betonirakentamisen oppaassa esitettiin René Feretin 1800-luvun loppupuolen tutkimusta, jossa hän selvitti hiekan rakeisuuden vaikutusta betonin ominaisuuksiin. Fere-
tin tutkimus osoitti, että keskikarkeiden hiekan (0,5-2 mm) vaikuttaa epäedullisesti betonin
ominaisuuksiin. Tästä syystä 1920-luvulla suositettiin hienorakeisten hiekkojen käyttöä (pie-
nempi kuin 0,5 mm) ja karkearakeista hiekkaa (2-5 mm).¹⁹⁸

Vuoden 1913 betonirakentamisen oppaassa suositettiin käyttämään pyöreäjyväistä soraa,
koska sillä betonia on helpompi sekoittaa ja työstää. Samassa kirjassa mainittiin, että sär-
mikästä soraa pidettiin myös hyvänä kiviaineksena korkean lujuuden takia.¹⁹⁹ 1920-luvulla
suositettiin käyttämään särmikään karkean kiviaineksen kanssa pyöreärakeista hienoa kiviiai-
nosta. Selityksenä siihen oli se, että pyöreät rakeet pakkaantuvat tiiviimmin kuin särmik-
kää rakeet. Tämän johdosta hienon kiviaineksen pyöreät rakeet täyttivät tyhjän tilan kar-
keiden rakeiden välillä paremmin kuin särmikkäät rakeet.²⁰⁰

Säästökivien käytöstä mainittiin vuoden 1922 betonirakentamisen oppaassa. Siinä suositel-
tiin käyttämään säästökivinä ensisijaisesti graniittia suuren lujuuden takia. Lisäksi säästö-
kivien kokoa suositettiin valitsemaan niin, että 1-2 miestä pystyisi sitä kantamaan. Suojabe-
tonin paksuus säästökivelle kuuluisi olla 5-10 cm.²⁰¹ Säästökivien käyttö ennen vuotta
1922 on myös hyvin todennäköistä.



Kuva 29. Bastionin Polhem B50 (vihreä viiva) ja vanhan levyhallin B5 (sininen viiva) kiviainesjakaumat ovat poikkeuksellisen hienojakoisia kantavien-rakenteiden betoneille nykystandardien mukaan. Lisäksi alle 0,071mm kiviainesta betoneissa on paljon. (Konov 2004, 17)

Suomessa Tuborg von Konov²⁰² tutki vuonna 2004 Suomenlinnan betonien ominaisuuksia, joiden joukossa oli myös betonien kiviaineksen rakeisuus. Tutkimustulokset ovat esitettynä kuvassa 29. Tutkimusaineiston kahden kohteen, bastioni Polhem B50 (vihreä viiva) ja vanha levyhalli B5 (sininen viiva), rakeisuuskäyrät ovat sopivia tämän diplomityön aihepiiriin. Bastionin Polhem B50 betonin kiviaineksen rakeisuus on noin 0/2 mm. Vanha levy-

¹⁹⁸ Muoniovaara 1922a, 14–18

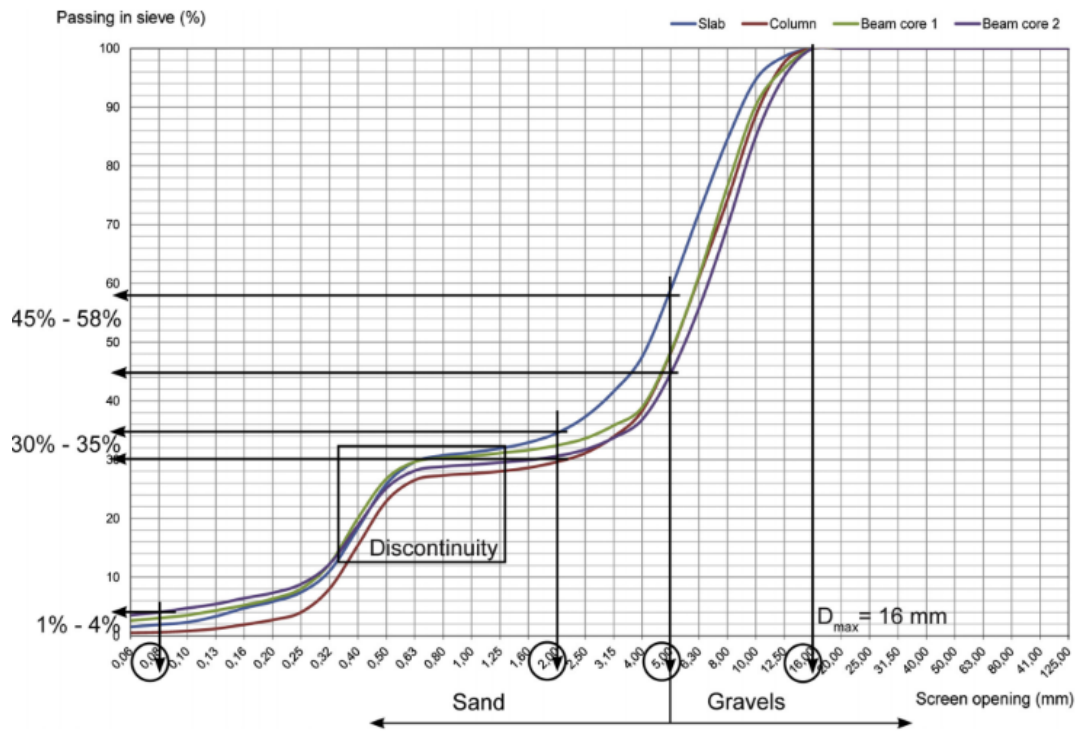
¹⁹⁹ Nykänen 1913, 13

²⁰⁰ Konov 2005, 8-9

²⁰¹ Muoniovaara 1922b, 4

²⁰² Konov 2004, 17–18

hallin B5 kiviaineksen rakeisuus on noin 0/4 mm. Molemmat kiviainestyyppit ovat poikkeuksellisen hienoja kantavien-rakenteiden betoneille nykystandardien mukaan. Fillerikiviainesta molemmissa betoneissa on korkeintaan 6,5-7 paino- %. Tutkimuksessa ei käytetty 0,063 seulaa vaan hienoin käytetty seula on 0,071. Tämän takia fillerikiviaineksen tarkka määrä jäi selvittämättä.²⁰³



Kuva 30. Colo-Hugues rautatiemaasillan betonissa kiviaineksen maksimiraekoko on 16 mm. Hiekan osuus on suuri ja vastaa nykyisiä määräyksiä. Kiviainesjakaumassa epäjatkuvuuskohta on 0,63 mm kiviaineksen kohdalla. Fillerin osuus on pieni (Hellebois ym. 2013, 151).

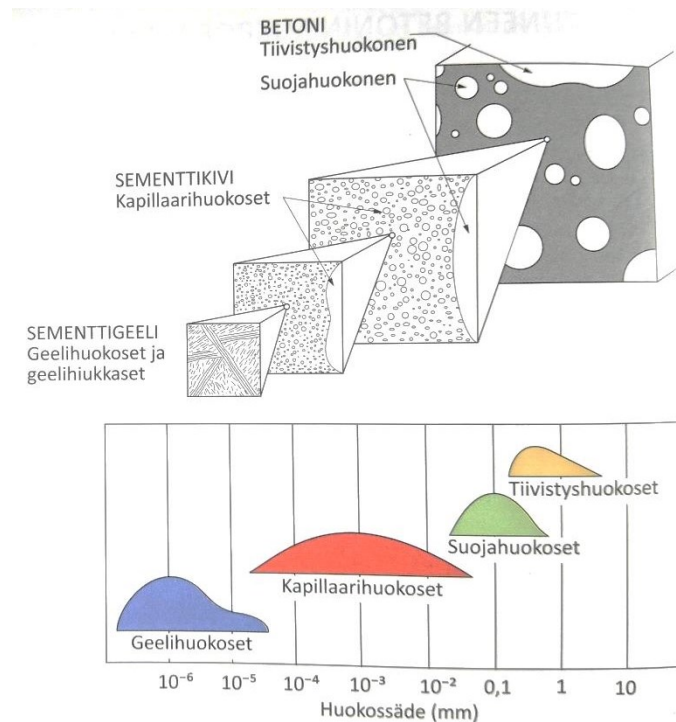
Belgiassa tutkittiin vuonna 1904 rakennetun Colo-Hugues rautatiemaasillan betonia. Betoninäytteitä otettiin kolmesta eri rakennusosasta: laatasta, pilarista ja palkista. Tutkimuksessa havaittiin sitä, että kiviaineksen rakeisuuskäyrät ovat samankaltaisia kaikille betoninäytteille (kuva 30). Kiviaineksen maksimiarvoksi todettiin 16 mm, mikä on tutkijan mielestä suhteellisen pieni kantavalle betonille. Alle 5 mm kiviaineksen osuus on suuri, noin 45–58 paino- %. Alle 2 mm hiekkarakeiden osuus on 30–35 paino- %. Tämä vastaa nykyisien standardien mukaista arvoa. Keskijakoisen hiekan 0,5-2 mm prosenttiosuus on suhteellisen pieni vain 15-20 paino- %. Tämä voi johtua Feretin tutkimusten tuloksista, joiden mukaan keskikarkeiden hiekan heikentää betonin ominaisuuksia. Alle 0,08 mm kiviaineksen osuus on välillä 1–4 paino- %.²⁰⁴

4.5 Historiallisten betonin huokossysteemi

Betoni sisältää erikokoisia huokosia, jotka luokitellaan neljän tyyppiin: geelihuokokset, kapillaarihuokokset, ilmahuokokset ja tiivistyshuokokset (kuva 31). Yhdessä ne muodostavat betonin huokossysteemin. Erityyppisillä huokosilla on suuri vaikutus betonin ominaisuuksiin kuten mm lujuuteen, pakkasenkestävyyteen, vedenimukykyyn.²⁰⁵

²⁰⁴ Hellebois ym. 2013, 155–157

²⁰⁵ Suomen Betoniyhdistys ry. 2018, 81–84



Kuva 31. Betoni sisältää erikokoisia ja erimuotoisia huokosia, joilla on suuri vaikutus betonin ominaisuuksiin. Huokokset voidaan luokitella neljän tyyppiin: geelihuokokset, kapillaarihuokokset, ilmahuokokset ja tiivistys- ja suojahuokokset (Suomen Betoniyhdistys ry. 2018, 82).

Geelihuokokset ovat hydrataatiotuotteiden väleihin jääviä hyvin pieniä huokosia, joiden säde on pienempi kuin $0,03 \mu\text{m}$. Kosteus sitoutuu geelihuokosiin pintavoimilla. Tämän takia veden liikkeet geelihuokosissa ovat todella hitaita. Lisäksi vesi jäätyy geelihuokosissa vasta $-40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ – $-78 \text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilassa.²⁰⁶

Kapillaarihuokokset ovat sädekoolta $0,03 - 1000 \mu\text{m}$. Ne muodostuvat betoniin silloin, kun hydrataatioreaktioista jää ylimääräistä vettä. Kapillaarihuokosten verkoston kautta vesi imeytyy betonin ympäristöstä ja liikkuu betonissa. Betonin kapillaarihuokosten verkon yhtenäisyyttä kutsutaan betonin tiiveydeksi. Veden jäätyminen kapillaarihuokosissa alkaa lämpötilavälillä $-5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ – $-12 \text{ }^{\circ}\text{C}$.²⁰⁷ Kapillaarihuokosten suuri määrä alentaa betonin lujuutta ja heikentävät pakkasenkestävyyttä. Lisäksi kapillaarisen vedenliikkeen myötä betoniin voi päästä haitallisia aineita.²⁰⁸

Ilmahuokokset kutsutaan myös suojahuukosiksi. Ne ovat säteeltä $10-800 \mu\text{m}$ pallomaisia huokosia, jotka syntyvät betoniin sekoituksen aikana. Huokosjaon ollessaan riittävän pieni (nykynormien mukaan noin $0,2 \text{ mm}$) vesi pääsee virtamaan kapillaarihuokosista ilmahuokosiin jäätyminen aikana. Tämän takia ilmahuokosten merkitys betonin suojaamisessa pakkasvaurioitumisesta on suuri. Huokosten määrä lisätään tarvittaessa huokostimien avulla.²⁰⁹

Tiivistys- ja suojahuukosia muodostuu betoniin riittämättömän tiivistyksen vuoksi. Tiivistys- ja suojahuukokset ovat säteeltä $0,8-10 \text{ mm}$, yleensä epämääräisen muotoisia huokosia.²¹⁰ Tiivistys- ja suojahuukosten suuri määrä alentaa betonin lujuutta ja voi heikentää pakkasenkestävyyttä.

²⁰⁶ Kuosa & Vesikari 2000, 9–10

²⁰⁷ Kuosa & Vesikari 2000, 10

²⁰⁸ Suomen Betoniyhdistys ry. 2018, 84

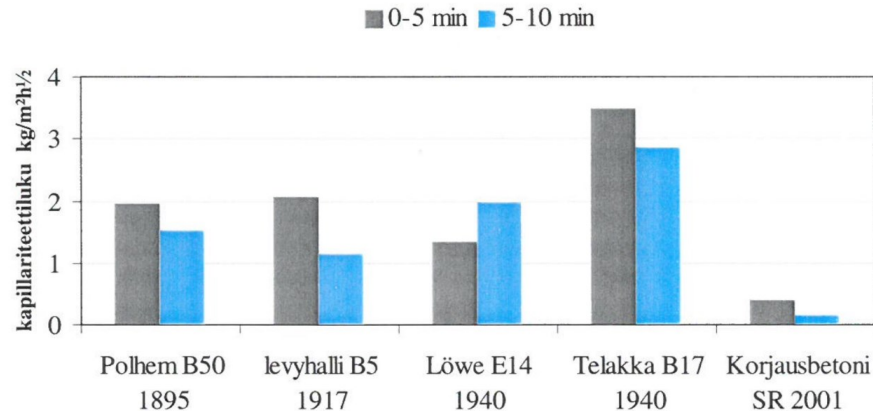
²⁰⁹ Suomen Betoniyhdistys ry. 2018, 84

²¹⁰ Kuosa & Vesikari 2000, 11

Yleisen käsityksen mukaan historiallinen betoni on huokoisempaa verrattuna moderneihin betoneihin. 1800-luvun ja 1900-luvun alun betonin tiivistysteknologian puutteiden takia sen ajan betoneissa yleensä esiintyy paljon suuria tiivistyshuokosia. Vuoden 1922 betoni-rakentamisen oppaassa Mauniovaara²¹¹ mainitsi ilmamäärän vaihteluksi 3-8 p-%. Tällä tavalla on todennäköistä, että ennen vuotta 1922 betoneissa voisi olla nykyisiä betoneita korkeampi ilmamäärä.

Vesisementtisuhteen merkityksen huomiotta jättäminen betonin valmistuksessa johti yleensä kapillaarihuokosien suuren määrän muodostamiseen. Louis Vicat 1830-luvulla esitti, että suurella huokoisuudella on haitallisia vaikutuksia betoniin ominaisuuksiin. Tätä tietoa alettiin ottamaan huomioon Euroopassa betoniteollisuudessa vasta 1910-luvulla²¹². Orgaanisten huokostimien käytöstä on esitetty epäilyksiä, mutta niitä on vaikea todistaa nykyisillä betonitutkimusmenetelmillä. Näistä syistä historiallisten betonien ilmahuokosten määrä ja huokosjako eivät täytä nykymääräyksiä.

Suomessa Tuborg von Konov²¹³ tutki vuonna 2004 Suomenlinnan betonien ominaisuuksia, joiden joukossa oli myös betonien huokoisuus. Tutkimusaineiston kaksi kohdetta, bastioni Polhem B50 ja vanha levyhalli B5, ovat sopivia tämän diplomityön aihepiiriin. Vuoden 1895 bastionin Polhem B50 betoninäytteen vedenimukyky on 6 paino-% ja vuoden 1915 vanhan levyhallin B5 betoninäytteen on 3,6 paino-%. Vertailukohteena oli moderni SR-sementistä valmistettu betoni, jonka vedenimukyky on 2,7 paino-%. Bastionin Polhem B50 betoninäytteen suuri vedenimukyky osoittaa, että betonin rakenne on huokoinen. Vastaa-vasti tutkimustuloksien mukaan vanhan levyhallin B5 betoni on tiiviimpi.²¹⁴



Kuva 32. Tuborg von Konovin tutkimus antaa käsitystä historiallisten betonien huokosrakteista. Von Konovin mielestä kapillarietteittiluvun avulla voidaan tutkia betoninäytteiden vesi-imukyvyn lisäksi huokosten luonetta. Suuri kapillarietteittiluku 0-5 min aikana osoittaa sen, että betoninäytteessä on paljon suuria, nopeasti vedellä täytettäviä huokosia, kuten esimerkiksi tiivistyshuokosia. Vastaavasti suuri kapillarietteittiluku 5-10 min aikana osoittaa sen, että betoninäytteessä on enemmän pieniä, hitaasti vedellä täytettäviä huokosia kuten esimerkiksi kapillaari- tai ilmahuokosia (Konov 2004, 16).

Lisäksi Tuborg von Konov²¹⁵ tutkivat Suomenlinnan betoninäytteiden kapillaarista imeytymiskykyä 0–5 ja 5–10 minuutin aikana. Tulokset on esitetty kuvassa 32. Molemmissa näytteissä ensimmäinen kapillarietteittiluku on isompi kuin toinen. Von Konovin mielestä

²¹¹ Muoniovaara 1922a, 10

²¹² Urquhart 2013, 15

²¹³ Konov 2004, 15–16

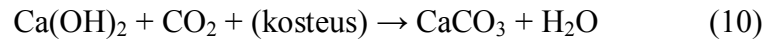
²¹⁴ Konov 2004, 15

²¹⁵ Konov 2004, 16

tämä osoittaa sen, että molemmissa näytteissä on pääosin suuria, nopeasti vedellä täyttyviä huokosia, jotka mahdollisesti ovat tiivistyshuokosia.

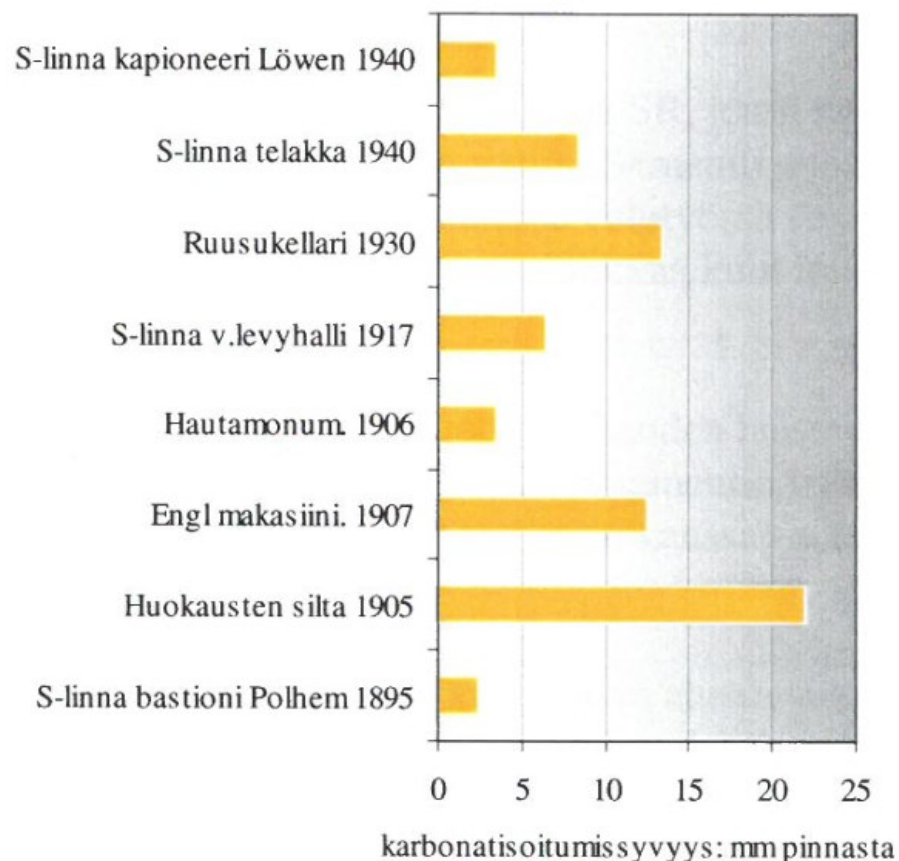
4.6 Historiallisten betonien karbonatisoituminen

Karbonatisoituminen on ilman hiilidioksidin reaktio betonin kalsiumhydroksidin kanssa. Karbonatisoitumisreaktion seurauksena muodostuu kalsiumkarbonaattia ja vettä. Reaktiota voidaan esittää seuraavasti²¹⁶:



Betonin karbonatisoitumisen seurauksena betonin emäksisyys laskee. Ilmiö ei itsestään heikennä betonin ominaisuuksia. Betonin karbonatisoituminen heikentää kuitenkin betonin suojavaikutusta raudotteiden korroosiota vastaan.²¹⁷ Ennen vuotta 1930 valmistuneissa betonirakenteissa raudotteita käytettiin huomattavasti vähemmän kuin nykyään. Tämän takia raudotteiden korrosio ei useinkaan ole rakenteen vaurioitumisen syy historiallisissa rakenteissa.

Karbonatisoitumisen nopeus riippuu monista betonin laatutekijöistä. Esimerkiksi tiiviissä betonissa karbonatisoitumisvyvyys voi olla pieni, koska hiilidioksidin pääsy karbonatisoitumisvyöhykkeelle on vaikeaa. Lisäksi ulkorasituksille alttiissa betonirakenteissa karbonatisoituminen hidastuu, kun huokosverkosto täytyy vedellä.²¹⁸



Kuva 33. Historiallisten betonien karbonatisoitumisvyvyys von Konovin tutkimuksen mukaan voi vaihdella paljon muuttamista millimetristä noin 25 mm:iin (Konow 2004, 18).

²¹⁶ BY Suomen Betoniyhdistys ry. 2018, 108–114

²¹⁷ BY Suomen Betoniyhdistys ry. 2018, 108–114

²¹⁸ BY Suomen Betoniyhdistys ry. 2018, 111–114

Laatutekijöiden lisäksi karbonatisoitumissyvyys riippuu betonin iästä. Karbonatisoitumisen arvioidaan etenevään noin 7-50 mm sadassa vuodessa. Suomenlinnan historiallisten betonien tutkimukset osoittavat kuitenkin, että karbonatisoitumissyvyys voi vaihdella muutamasta millimetristä noin 25 millimetriin sata vuotta vanhoissa betonirakenteissa (kuva 33).²¹⁹ Lisäksi vuonna 1904 rakennetun Colo-Hugues rautatiemaasillan betonin karbonatisoitumissyvyys mittauksen mukaan on 8-10 mm²²⁰. Näiden tietojen nojalla on mahdollista olettaa, että historiallisten betonien karbonatisoitumissyvyys voi olla erittäin pieni riippuen betonin olosuhteista, koostumuksesta ja huokosrakenteesta.

Kalsiumhydroksidi- ja kalsiumkarbonaattipitoisuudet kertovat karbonatisoitumisprosessin etenemisestä betonissa. Kalsiumhydroksidipitoisuus betonissa laskee ja kalsiumkarbonaattipitoisuus kasvaa silloin, kun karbonatisoitumisprosessi etenee. Kun kalsiumhydroksidipitoisuus betonissa laskee nollaan, karbonatisoitumisprosessi betonissa pysähtyy.²²¹

Monet betonitutkimukset Suomessa ja ulkomailla osoittavat, että ennen vuotta 1930 valmistettujen historiallisten betonien kalsiumhydroksidipitoisuus voi olla usein suurempi kuin nolla.

kalsiumhydroksidipitoisuuden 1,37 p-%

kalsiumhydroksidipitoisuus on 1,96 p-%.

kalsiumhydroksidipitoisuus on 0,73 p-%.²²³

kalsiumhydroksidipitoisuuden

olevan välillä 6,66–11,20 p-% .

²¹⁹ Konow 2004, 18

²²⁰ Hellebois ym. 2013, 152

²²¹ BY Suomen Betoniyhdistys ry. 2018, 111–114

²²² Vahanen Oy. 2011

²²³ Konov, T.v. 2003a

²²⁴ Callebaut ym. 2000, 401

5 Historiallisten betonien tutkimusmenetelmät

Ennen korjaustoimenpiteiden suunnittelua korjauskohdetta on tutkittava perusteellisesti ja järjestelmällisesti. On tärkeä kerätä tietoja alkuperäisistä rakennusmateriaaleista ja -tekniikoista, mahdollisesti esiintyvistä vaurioista ja saada selville vaurioita aiheuttavia tekijöitä. Tässä luvussa käydään läpi ensin korjauskohteen yleisiä tutkimusmenetelmiä. Tämän jälkeen käydään läpi yksityiskohtaisemmin historiallisten betonien tutkimusmenetelmiä, jotka ryhmitellään tutkittavien ominaisuuksien mukaan.

Tässä diplomityössä käsitellään yleisimmät historiallisten betonien tutkimusmenetelmät. Betonin tutkimusmenetelmän valintaan vaikuttavat monet asiat kuten esimerkiksi betonirakennelman käyttötarkoitus, ikä tai betonin rapautumisen määrä. Tämän takia jossain korjaustapauksissa voi tulla tarvetta erikoisemmille tutkimusmenetelmille.

5.1 Korjauskohteen yleiset tutkimusmenetelmät

Tarvittavia tietoja korjauskohteesta kerätään a) tutkimalla korjauskohteen suunnitteluasiakirjoja sekä aikaisempien korjauksien asiakirjoja, b) suorittamalla silmämääräistä kuntoselvitystä, c) tekemällä kenttätutkimuksia ja d) tekemällä laboratoriotutkimuksia.²²⁵

Alkuperäiset suunnitteluasiakirjat voivat antaa tietoja muun muassa korjauskohteen rakennustekniikasta ja rakennusmateriaaleista. Vanhat rakennesuunnitelmat eroavat paljon nykypäivän rakennesuunnitelmista eivätkä välttämättä sisällä kaikkia tarvittavia tietoja. Lisäksi toteutus voi erota merkittävästi suunnitelmista. Tästä syystä vanhojen suunnitteluasiakirjojen tietoihin pitää suhtautua kriittisesti. Aikaisempien korjausten yhteydessä tehdyistä tutkimusraporteista voidaan selvittää tietoja alkuperäisistä rakennusmateriaaleista ja -tekniikoista. Lisäksi korjausasiakirjat sisältävät tietoja aikaisempien korjausten korjaustoimenpiteistä ja -materiaalien valinnasta.²²⁶

Yleensä alkuperäiset suunnitteluasiakirjat ja edellisten korjausten asiakirjat ovat kokonaan tai osittain hävinneet.²²⁷ Tässä tapauksessa tietoja suoritetuista korjaustoimenpiteistä on joskus mahdollista saada haastattelemalla korjaukseen osallistuvia tekijöitä ja asiantuntijoita²²⁸. Lisäksi rakennusalan julkaisut voivat antaa hyödyllisiä tietoja 1800-luvun loppupuolen ja 1900-luvun alkupuolen suunnittelusta, rakentamisesta ja samankaltaisista rakennuksista. Näiden tietojen kerääminen ja analysointi antaa ymmärrystä kulttuuriperinnön merkityksestä ja luo pohjaa jatkoselvityksille.²²⁹

Yleensä kartoitettavissa kohteissa tehdään ensin silmämääräistä kuntoarviota. Tämän avulla saadaan yleinen käsitys korjauskohteen kunnosta sekä osoitetaan alueita, jotka edellyttävät yksityiskohtaisempaa tutkimista. Silmämääräisen kuntoarvioinnin jälkeen suoritetaan tarkka silmämääräinen kuntoselvitys.²³⁰ Historiallisten rakenteiden silmämääräistä kuntoselvitystä tehdään standardin SFS-EN 16096 mukaan.

Korjauskohteen silmämääräisellä kuntoselvityksellä saadaan tietoja sen kunnosta ja vaurioiden luonteista. Silmämääräinen kuntoselvitys osoittaa myös mahdolliset erot toteutuksen ja käytettävissä olevien suunnitelmien välillä. Tämän tuloksena on yksityiskohtainen ra-

²²⁵ Suomen Betoniyhdistys ry. 2013, 91

²²⁶ Urquhart 2014a, 14

²²⁷ Urquhart 2014a, 14

²²⁸ Winterhalter 2018, haastattelu

²²⁹ Urquhart 2014a, 14

²³⁰ Urquhart 2014a, 15

portti, joka sisältää tietoja jokaisesta vauriosta, sen tyypistä, sijainnista ja laajuudesta. Nämä tiedot on kirjattava muistiinpanojen, valokuvien ja kaavioiden avulla. Silmämääräisessä kuntoselvityksessä myös tunnistetaan ja kirjataan raporttiin aikaisempien korjausten sijainti, luonne ja kunto. Silmämääräisen kuntoselvityksen pohjalta voidaan määrittää jatkotutkimuksia ja näytteenottopaikkoja.²³¹

Johtopäätöksiä korjauskohteen kunnosta, alkuperäisistä rakennusmateriaaleista ja niiden laadusta tehdään vasta kenttä- ja laboratoriotutkimusten tulosten analysoinnin jälkeen. Kenttätutkimuksia suoritetaan korjauskohteessa. Ne ovat ainetta rikkomattomia betonin tutkimuksia. Ainetta rikkomattomat tutkimukset saattavat sisältää pieniä porauksia tai jonkinasteisten avauksien tekoa, mutta rakennetta ei kuitenkaan vaurioiteta merkittävästi. Joissakin tapauksissa kenttätutkimuksissa voidaan mahdollisesti käyttää olemassa olevia aukkoja.²³²

Laboratoriotutkimuksia tai ainetta rikkovia tutkimuksia varten otetaan tutkimuskohteesta näytteitä. Historiallisten rakenteiden näytteenottoon pitää soveltaa kansainvälistä standardia SFS-EN 16085. Näytteenotto aiheuttaa aina vahinkoa betonirakenteelle. Sen takia näytteiden määrää ja näytteenottopaikkojen sijaintia pitää suunnitella ja päättää tarkasti ja harkitusti. Lisäksi suojeltujen korjauskohteiden tapauksessa valinta on sovittava suojeluviranomaisten kanssa. Mahdollisuuksien mukaan näytteet otetaan paikoista, jotka mahdollisimman vähän heikentävät rakenteen kantavuusominaisuuksia tai vaikuttavat rakenteen ulkonäköön.²³³ Laboratoriotutkimukset antavat tarkkoja tietoja betonin ominaisuuksista. On kuitenkin huomattava, että pienen näytemäärän perusteella voi olla vaikea arvioida koko rakenteen ominaisuuksia.

5.2 Betonin mikrorakenteen ja -koostumuksen tutkiminen

Mikrorakennetta määrittävät tutkimusmenetelmät ovat käytetyimpiä historiallisten rakennusmateriaalien tutkimusmenetelmiä, koska mikrorakenneanalyysin avulla voidaan parhaiten ymmärtää historiallisten betonien ominaisuuksia. Mikrorakennetta ja -koostumusta määrittävillä tutkimusmenetelmillä saadaan tarkkoja tietoja historiallisten betonien mikrorakenteesta jopa 1 nm tarkkuudella. Historiallisten betonien mikrorakennetta ja sen vaikutusta ominaisuuksiin käsiteltiin luvussa 4. Mikrorakennetta määrittävien tutkimusmenetelmien näytetarve on yleensä suhteellisen pieni, joten historiallisia betonirakenteita vaurioitetaan vähemmän kuin muita laboratoriotutkimusmenetelmiä varten. Alla on esitetty yleisimmät historiallisten betonien mikrorakenteen laboratoriotutkimusmenetelmät.

5.2.1 Optiset menetelmät

Optiset menetelmät ovat hyvin tehokkaita betonin mikrorakenteen tutkimusmenetelmiä. Optisilla menetelmillä on mahdollista selvittää suuria määriä tietoja betonin mikrorakenteesta. Optiset menetelmät eroavat toisista laitteistolla, tulosten laajuudella ja tarkkuudella sekä preparaatin valmistusteknikoilla. Alla on esitetty kolme yleistä optista menetelmää, joita käytetään historiallisten betonien tutkimuksissa

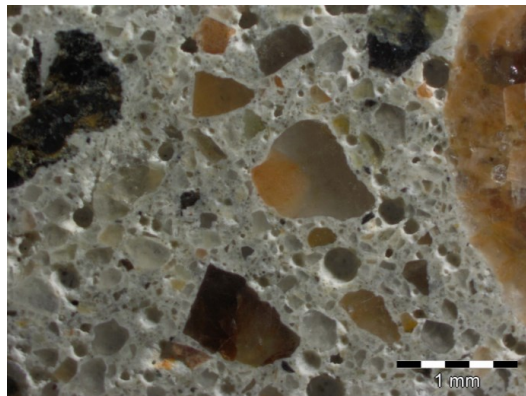
Pintahieanalyysi tehdään yleensä stereo- tai pintavalomikroskoopilla, joiden toiminta perustuu pintahieestä heijastuvan valon analysointiin. Pintahie on laboratoriossa valmistettu, hiottu ja kiillotettu tasopinta. Pintahiepreparaatti on suhteellisen nopea ja yksinkertainen valmistaa. Lisäksi pintahieanalyysillä voidaan tutkia pinta-alaltaan suhteellisen suuria be-

²³¹ Urquhart 2014a, 15

²³² Urquhart 2014a, 16

²³³ Urquhart 2014a, 19

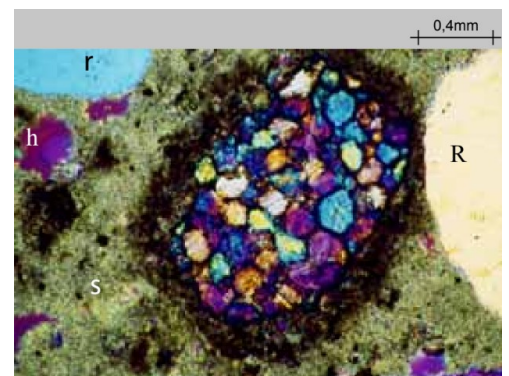
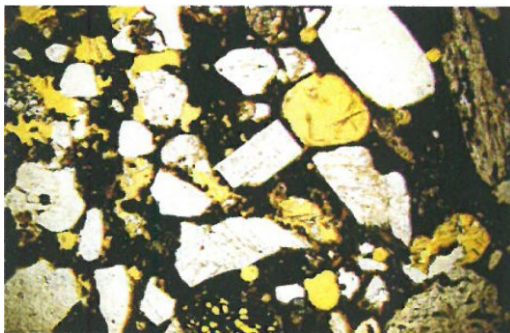
toninäytteitä. Näistä hyödyistä huolimatta historiallisia betoneja tutkitaan nykyään yleensä ohuthieanalyysillä. Syynä siihen on, että pintahieanalyysin tarkkuus on selvästi pienempi kuin ohuthieanalyysissä.²³⁴



Kuva 34. Modernin betonin rakenne pintahieanalyysissä. Betonirakenteesta selkeästi erottuvat sideaine (vaalea) ja kiviaines (oranssiruskea) (Huuhtanen 2017, 36).

Ohuthieanalyysi on suosituin betonin mikrorakenteen optinen tutkimusmenetelmä.²³⁵ Yleisenä pohjana ohuthieen valmistukselle ja tutkimuksille toimii standardi ASTM C856. Ohuthie on paksuudelta noin 25 – 30 µm betoninäytepreparaatti, joiden läpi valo pääsee kulkemaan. Tämän johdosta ohuthietä voidaan tutkia polarisaatiofluoresenssimikroskoopilla erilaisten polarisaattoreiden, linssien ja himmentimien avulla. Ohuthietutkimuksella voidaan arvioida muun muassa tutkittavan historiallisen betoninäytteen sideainetyyppejä, kiviaineksen laatua ja rakeisuusjakamaa, ilmahuokosrakennetta, pakkasenkestävyyttä, hydrataatioastetta ja kuntoa.²³⁶

Ohuthieanalyysillä voidaan määrittää luotettavasti historiallisten betonien sideainetyyppejä, joka on merkittävä tieto historiallisten betonien iän ja ominaisuuden arvioinnissa. Esimerkiksi vuonna 1905 valmistetun Helsingin kansalliskirjaston Rotunda-rakennuksen julkisivun betonikoristeiden sideainetyyppejä arvioitiin ohuthieanalyysillä kalsiumsilikaattien pitoisuuksien perustella²³⁷. Myös erilaiset apuvälineet, kuten polarisaattorit tai syövytysaineet, parantavat ohuthieanalyysin tulosten tarkkuutta historiallisten betonien sideainetyypin määrittämisessä²³⁸.



Kuva 35. Historiallisten betonin rakenne ohuthieanalyysissä. Oikeassa kuvassa Bastionin Polhem betonin rakenne on esitetty nelinkertaisella suurennoksella (Konow 2004, 11). Vasemmassa kuvassa 20-kertaisella suurennoksella (Konow 2006, 21).

²³⁴ Klami 2018

²³⁵ Elsen 2005, 1417–1418

²³⁶ Klami 2018

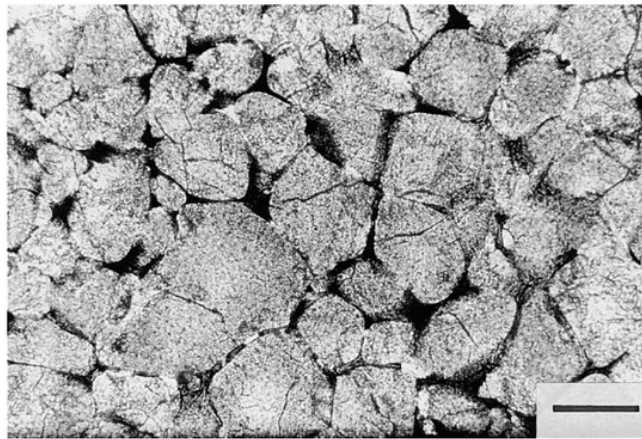
²³⁷ Winterhalter ym. 2014, liite 3

²³⁸ John, Poole & Sims 1998, 83–92

Pyyhkäisyelektronimikroskooppianalyysi (SEM) perustuu kiihdytetyn elektronisuihkun toimintaan, jolla voidaan tutkia betoninäytettä 100 kertaa suuremmalla suurennuksella verrattuna pintahie- ja ohuthieanalyysihin²³⁹. Menetelmällä voidaan tutkia betonin mikrorakennetta atomitasolla, mikä mahdollistaa esimerkiksi eri betonipartikkeleiden rakenteen selvittämisen.

Pyyhkäisyelektronimikroskooppianalyysillä yhdistettynä röntgendiffraktiomenetelmään voidaan selvittää muun muassa hydratoimattomien sideainepartikkelien koostumusta. Tämän tiedon perustella voidaan arvioida sideaineen tyyppiä. Tätä menetelmää käytettiin mm. Suomenlinnan historiallisten betonien sideaineen tutkimuksessa.²⁴⁰

Tutkimustulosten analysointi vaatii asiantuntijalta kokemusta ja hyvää tietämystä historiallisten betonien rakenteesta. Tämä rajoittaa pyyhkäisyelektronimikroskooppianalyysin käyttöä Suomessa historiallisten betonien tutkimuksissa.²⁴¹



Kuva 36. Historiallisen muurauslaastin sideainepartikkelin rakenne pyyhkäisyelektronimikroskooppianalyysissä. Mittaviivan pituus on 0,067 mm (Callebaut ym. 2000, 399).

5.2.2 Kemialliset menetelmät

Kemialliset menetelmät ovat perinteisiä betoninäytteiden kemiallisen koostumuksen²⁴² ja sidekiviainessuhteiden selvittämiseen tarkoitettuja menetelmiä. Kemialliset menetelmät perustuvat betonin kemiallisten yhdisteiden liukenemiseen happoon. Liuoksesta analysoidaan oksidien ja sideaineen yhdisteiden määriä. Happoon liukenemattomasta jäännöksestä voidaan määrittää kiviaineksen määrä ja rakeisuusjakauma.²⁴³

Kemiallisiin menetelmiin liittyy muutamia epävarmuustekijöitä, jotka vääristävät lopputuloksia. Osa hienosta kiviaineksesta liukenee hapossa. Tämä kiviaines voidaan tulkita virheellisesti sideaineeksi. Lisäksi sideainemäärän laskentakaaviossa käytetään vertailuarvona modernin portlandsementin ominaismääriä. Tämän takia historiallisten betonien analyysiin voi helposti tulla vääristymiä silloin, kun sideaineen tyyppi ei olekaan portlandsementti.²⁴⁴

²³⁹ Zhao ym. 2019, 10

²⁴⁰ Konow 2004

²⁴¹ Koskinen 2019b, haastattelu

²⁴² Callebaut ym. 2000, 401

²⁴³ Konow 2006, 31–32

²⁴⁴ Konow 2006, 31–32

Ottamalla huomioon mahdollisia varmuustekijöitä voidaan parantaa sideaineen ja kiviaineksen määrien määrittämisen tarkkuutta.²⁴⁵ Tästä huolimatta tulosten tulkinta on vaikeaa ja yleensä mahdotonta ilman hyvää tietämystä eri komponenttien luonteesta näytteessä.²⁴⁶

5.2.3 Röntgensäteilyyn pohjautuvat menetelmät

Röntgensäteilyyn pohjautuvat menetelmät ovat hyvin tunnettuja ja rakennusmateriaalien tutkimuksissa laajasti käytettyjä menetelmiä. Menetelmät antavat luotettavia tuloksia muun muassa betoninäytteiden mineralogisesta (röntgendiffraktiomenetelmää) ja kemiallisesta (röntgenfluoresenssimenetelmä) koostumuksista.²⁴⁷

Röntgenfluoresenssimenetelmä (XRF) on yksi käytetyimmistä tutkimusmenetelmistä historiallisten rakennusmateriaalien alkuainekoostumuksen analysointiin. Menetelmä perustuu fluoresenssiemissioon. Betoninäytteen kohdistetun röntgensäteilyn avulla viritetään sen atomeja. Viritetyt atomit palautuvat kutakin alkuainetta vastaavaa energiaeroa karakteristisenä säteilynä. Tämän avulla saadaan tietoja näytteen alkuaineista ja niiden pitoisuuksista, koska näin pienen näytteiden otto harvoin vaurioittaa huomattavasti olemassa olevaa rakennetta.²⁴⁸

Röntgendiffraktiomenetelmää (XRD) käytetään betoninäytteiden mineralogiseen koostumuksen selvittämiseksi. Röntgensäteily siirtyy kullekin mineraalille tai kemialliselle yhdisteille ominaisella tavalla. Röntgensäteilyn siirtokulma riippuu mineraalien tai kemiallisten yhdisteiden kiderakenteesta. Heijastuneiden säteilyjen kulmien perustella voidaan tunnistaa betoninäytteen sisältämiä mineraalia ja kemiallisia yhdisteitä. Analyysiä suoritetaan vertailemalla tutkimustuloksia referenssitietoihin joko manuaalisesti tai tietokoneohjelman avulla.²⁴⁹ Analyysi antaa tuloksena historiallisten betonien kemiallista koostumusta. Lisäksi röntgendiffraktiomenetelmällä yhdistettynä pyyhkäisyelektronimikroskooppianalyysiin voidaan määrittää sideainetyyppejä esimerkiksi hydratoimattomien sideainepartikkelien koostumuksen perustella.²⁵⁰

5.2.4 Termooanalyttiset menetelmät

Termoanalyttisillä menetelmillä (TA) tutkitaan materiaalien käyttäytymistä lämpötilan muutoksen seurauksena. Useimmiten käytetään kolmea termooanalyttistä menetelmää: termogravimetrinen analyysi (TG tai TGA), differentiaalinen termooanalyysi (DTA) ja differentiaalinen pyyhkäisykalorimetrinen analyysi (DSC). Menetelmät eroavat toisistaan laitteiston, toimintaperiaatteiden ja saadun aineiston laajuuden osalta.²⁵¹ Termooanalyttisiä menetelmiä käytetään yleensä yhdessä, koska tutkimuksissa saadut tiedot tukevat toisiaan. Tutkimustulosten perustella voidaan arvioida betoninäytteen kemiallista ja mineralogista koostumusta.²⁵² Termooanalyysiin näytetarve on minimissään 50 mg.²⁵³

Termogravimetrisella analyysillä (TG tai TGA) mitataan betoninäytteen painon muutosta ajan funktiona lämpötilan muuttuessa. Analyysissä korkein käytetty lämpötila on yleensä

²⁴⁵ Konow 2006, 31–32

²⁴⁶ Elsen 2005, 1416

²⁴⁷ Zhao ym. 2019, 24–28

²⁴⁸ Zhao ym. 2019, 24–27

²⁴⁹ Zhao ym. 2019, 27–28

²⁵⁰ Callebaut ym. 2000, 398

²⁵¹ Zhao ym. 2019, 22–24

²⁵² Zhao ym. 2019, 22–24

²⁵³ Koskinen 2019b, haastattelu

1000 °C.²⁵⁴ Termogravimetrisellä analyysillä määritetään betoniyhdisteiden pitoisuuksia kuten esimerkiksi kalsiumhydroksidin ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) tai kalsiumkarbonaattiin (CaCO_3) pitoisuuksia,²⁵⁵ joiden vaikutusta betonin ominaisuuksiin käsiteltiin luvussa 4.6.

Differentiaalisessa termoanalyysissä (DTA) mitataan betoninäytteen ja vertailunäytteen (tyypillisesti materiaalina on Al_2O_3) lämpötilan muutoksia samoissa olosuhteissa tasaisen kuumentumisen aikana. Analyysissä korkein käytetty lämpötila on yleensä 1600 °C. Menetelmä tarjoaa tietoja kaikista muutoksista, jotka tapahtuvat näytteen koostumuksessa kuumentumisen aikana. Tuloksena saadaan tietoja muun muassa rakenteen hajoamisesta, faasinmuodostuksesta, kiteytymisestä jne.²⁵⁶ Differentiaalinen termoanalyysi on tehokas menetelmä betoninäytteen mahdollisesti sisältämien orgaanisten komponenttien tunnistamiseksi²⁵⁷.

Differentiaalisella pyyhkäisykalorimetrisellä analyysillä (DSC) mitataan betoninäytteen ja vertailunäytteen energian muutoksia samoissa olosuhteissa tasaisen kuumentumisen aikana. Menetelmä on melko samanlainen kuin DTA. Differentiaalisella pyyhkäisykalorimetrisellä analyysillä saadaan selville betoninäytteen lämpökapasiteetti, reaktiolämpö, muunnoslämpö, reaktionopeus, kiteytymisnopeus jne.²⁵⁸

5.3 Betonin lujuuden tutkiminen

5.3.1 Puristuslujuuden määrittämisen suorat menetelmät

Betonin puristuslujuus on tärkeä ominaisuus erityisesti kantaville rakenteille. Korjauskohteen alkuperäisen betonin lujuutta on syytä ottaa huomioon korjausbetonin valinnassa, koska liian luja korjausbetoni voi vaurioittaa alkuperäisiä betonirakenteita. Sekä laboratoriotutkimusmenetelmät että kenttätutkimusmenetelmät soveltuvat historiallisten betonien puristuslujuuksien määrittämiseen.

Yleensä laboratorio-olosuhteissa puristuslujuutta määritetään suorilla tutkimusmenetelmillä kuten *puristuskokeella* standardia SFS-EN 12390-3 soveltaen. Menetelmässä betonintäytteen puristuskuormitusta mitataan ajan funktiona koko kuormituksen ajan. Menetelmässä käytetään yleensä halkaisijalta 50–100 mm poranäytteitä, joiden halkaisijan ja pituuden suhde on 1:1. Puristuslujuuden määrittämisessä saadaan riittävä otanta luotettavan tuloksen saamiseksi vähintään kolmella poranäytteellä.²⁵⁹ Betoninäytteiden suuren koon ja lukumäärän takia menetelmää käytetään harvoin historiallisten rakenteiden puristuslujuuden määrittämiseen.

5.3.2 Vetolujuuden määrittämisen suorat menetelmät

Betonin vetolujuus on keskimäärin 1/10 osaa betonin puristuslujuudesta. Yleensä rakenteen kuormituksen näkökulmasta vetolujuuden arvo ei ole olennainen. Vetolujuuden arvon perusteella voidaan kuitenkin arvioida betonin rapautumistasoa. Rapautumisen seurauksena syntyvät mikrohalkeamat alentavat erityisesti betonin vetolujuutta.²⁶⁰

²⁵⁴ Zhao ym. 2019, 22–24

²⁵⁵ Koskinen 2019b, haastattelu

²⁵⁶ Zhao ym. 2019, 22–24

²⁵⁷ Koskinen 2019b, haastattelu

²⁵⁸ Zhao ym. 2019, 22–24

²⁵⁹ Punkki 2019, haastattelu

²⁶⁰ Suomen Betoniyhdistys ry. 2018, 89–91

Yleensä betonin vetolujuutta määritetään poranäytteiden avulla laboratoriomenetelmillä.²⁶¹ Yleensä betoninäytteiden vetolujuutta mitataan suoralla *vetokokeella* standardia SFS 5445 soveltaen. Vetokokeissa käytetään halkaisijalta 50–75 mm poranäytteitä. Vetolujuuden lisäksi tutkitaan myös murtopinnan muotoa, joka antaa tietoja betoninäytteen murtumisen syistä.²⁶²

Vetokoe yksinään sopii huonosti betonin rapautumistason arviointiin, koska alhainen vetolujuus voi johtua myös muista tekijöistä kuin betonin rapautumisesta. Esimerkiksi kiviaineksen laatu tai alhainen lujuus alentavat betonin vetolujuutta. Muilla betonin tutkimusmenetelmillä, kuten ohuthienanalyysillä, voidaan täydentää vetokokeen tuloksia.²⁶³

5.3.3 Veto- ja puristuslujuuden määrittämisen epäsuorat menetelmät

Historiallisten betonirakenteiden kohdalla on yleensä syytä käyttää epäsuoria kenttätutkimusmenetelmiä veto – ja puristuslujuuden määrittämisessä, koska kenttätutkimusmenetelmät vaurioittavat betonirakenteita huomattavasti vähemmän laboratoriotutkimusmenetelmiin nähden. Lisäksi kenttätutkimuksilla pystytään tutkimaan betonin puristuslujuutta laajalta alueelta.

Yksi käytetyimmistä kenttätutkimusmenetelmistä on *iskuimpulssimenetelmä*, eli *kimmo-vasaramenetelmä*. Menetelmä on betonin puristuslujuuden määrittämisen epäsuora menetelmä. Iskuimpulssimenetelmä perustuu betonin puristuslujuuden arviointiin betonipinnan kimmoarvon perustella. Kimmoarvoa määritetään kimmovasaran takaisinkimmahduksen matkan avulla, sen jälkeen kun kimmovasaralla iskettiin betonin pintaan. Kimmoarvoa voidaan myös määrittää energian tai nopeuden muutoksena ennen iskua ja iskun jälkeen.²⁶⁴ Iskuimpulssimenetelmää tehdään yleensä standardia SFS-EN 12504-2 soveltaen.

Iskuimpulssimenetelmä on ainetta rikkomaton menetelmä, mutta joskus kimmovasaran iskuimpulssi voi vaurioittaa betonipintaa. Tästä huolimatta menetelmä soveltuu hyvin historiallisten yli 100 mm paksujen betonirakenteiden puristuslujuuden arviointiin.²⁶⁵ Tämän lisäksi iskuimpulssimenetelmällä pystytään paikantamaan suhteellisen helposti rakenteen heikompia alueita, joissa betonin puristuslujuus on alhaisempi verrattuna keskiarvoon.²⁶⁶

Ultraäänimenetelmällä mitataan laitteiston lähettämän ultraäänen etenemisnopeutta betonipinnan läpi. Tämän tiedon perustella voidaan määritellä esimerkiksi betonin tiheyttä, halkeamien syvyyttä ja betoninheikkousvyöhykkeet.²⁶⁷ Ultraäänimenetelmää tehdään yleensä standardia SFS-EN 12504-4 soveltaen. Menetelmän vaaditut toimenpiteet eivät vaurioita betonia, joten ultraäänimenetelmä soveltuu erittäin hyvin historiallisten betonirakenteiden tutkimiseen.

Ultraäänimenetelmän tulosten perustella ei voida määritteellä vetolujuutta, mutta voidaan arvioida betonin rapautumistasoa.²⁶⁸ Tämän lisäksi ultraäänimenetelmän tulosten perustella voidaan arvioida betonin puristuslujuutta. Tuntematon betoniseoksen lujuuden arviointi kuitenkin pelkän pulssinopeuden perusteella ei ole luotettavaa.²⁶⁹

²⁶¹ Suomen Betoniyhdistys ry. 2002, 103–105

²⁶² Suomen Betoniyhdistys ry. 2002, 103–105

²⁶³ Suomen Betoniyhdistys ry. 2002, 103–105

²⁶⁴ Urquhart 2014a, 17

²⁶⁵ Urquhart 2014a, 17

²⁶⁶ English heritage 2012, 137

²⁶⁷ Urquhart 2014a, 17

²⁶⁸ Urquhart 2014a, 17

²⁶⁹ SFS-EN 12504-4

5.4 Betonin pakkasenkestävyyden tutkiminen

Pakkasenkestävyys on Suomen olosuhteissa yksi tärkeimmistä betonin ominaisuuksista betonirakenteiden säilyvyyden kannalta.²⁷⁰ Pakkasvaurioitumisella tarkoitetaan betonin sisältämän veden jatkuvan jäätyminen ja sulamisen aiheuttavaa vaurioitumista. Pakkasvaurioitumista aiheuttavat fysikaaliset ja kemialliset ilmiöt ovat riippuvaisia veden käyttäytymisestä erilaisissa betonin huokosissa.²⁷¹ Historiallisten betonien huokosrakennetta käsiteltiin luvussa 4.5.

Betonin pakkasvaurioitumisen mekanismeja pyritään selittämään erilaisilla teorioilla. Tunnetuin pakkasvaurioitumisen teoria on hydraulisen paineen teoria. Teorian mukaan vaurioitumista aiheuttaa betonin kapillaarihuokosissa oleva vapaa vesi. Kun vapaa vesi jäätyy, se laajenee noin 9 tilavuus- % ja työntää osaa jäätyttömästä vedestä pois kapillaarihuokosesta. Veden siirtyminen aiheuttaa betoniin paikallisia jännityksiä, jotka vaurioittavat betonia. Teoria soveltuu hyvin tavallisille betoneille, joiden vesi-sementtisuhte on suurempi kuin 0,5. Vapaan veden jäätymlaajentumisen lisäksi pakkasvaurioita voivat aiheuttaa esimerkiksi mikroskooppisten jäälinsien kasvu tai sementtikiven ja kiviaineksen erisuuruinen lämpölaajeneminen.²⁷²

Betonin pakkasvaurioitumisen merkkejä, kuten pinnan halkeilua ja rapautumista, pystytään havaitsemaan *silmämääräisellä kuntoselvityksellä*. Tarkemmin betonin pakkasenkestävyyttä voidaan arvioida vain *laboratoriokokeilla*. Pakkaskestävyyden arviointimenetelmät voidaan jakaa niiden periaatteen mukaisesti *suoriin* ja *epäsuoriin menetelmiin*.²⁷³

5.4.1 Suorat menetelmät

Suorilla menetelmillä tutkitaan betonin käyttäytymistä kiihdytetyissä ja yksinkertaistetuissa jäätymisolosuhteissa. On olemassa monia koemenetelmiä ja vastaavia virallisia standardeja.²⁷⁴ Suomessa tällä hetkellä suosituin pakkasenkestävyyden määrittämisen suora menetelmä on *laattakoe*, jota tehdään teknistä raporttia CEN/TR 15177 soveltaen²⁷⁵. Lisäksi yleensä suoritetaan *jäädytys-sulatuskokeita* muun muassa standardien SFS 5447 tai ASTM C 666 mukaisesti²⁷⁶.

Ohjeista riippumatta kokeet koostuvat koekappaleiden valmistavasta vaiheesta ja toistuvista jäädytys-sulatusjaksoista. Jäädytys- ja sulatuslämpötilat riippuvat valitusta koemenetelmästä, kuten myös jäädytys-sulatusjaksojen määrästä. Näytteiden koko ja määrä ovat myös määritetty erikseen jokaista koemenetelmää varten.²⁷⁷ Esimerkiksi laattakokeessa koekappaleena käytetään laattaa, jonka dimensiot ovat 150 mm x 150 mm x 50 mm²⁷⁸.

Suorilla menetelmillä pystytään luotettavasti arviomaan betonin pakkasenkestävyyttä. Tutkimusmenetelmällä kuitenkin saadaan yleensä selville vähemmän tietoja betonin ominaisuuksista kuin epäsuorilla tutkimusmenetelmillä. Tämän lisäksi betoninäytteiden koko on suhteellisen suuri, koska halutaan saada luotettavia ja vertailukelpoisia tuloksia.

²⁷⁰ Suomen Betoniyhdistys ry. 2018, 116–118

²⁷¹ Kuosa & Vesikari 2000, 9–10

²⁷² Kuosa & Vesikari 2000, 9–17

²⁷³ Kuosa & Vesikari 2000, 50

²⁷⁴ Kuosa & Vesikari 2000, 50–58

²⁷⁵ Punkki 2019, haastattelu

²⁷⁶ Kuosa & Vesikari 2000, 50–58

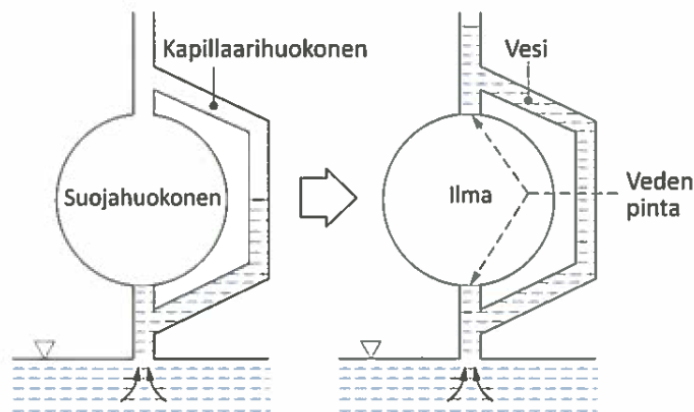
²⁷⁷ Kuosa & Vesikari 2000, 50–58

²⁷⁸ CEN/TR 15177

5.4.2 Epäsuorat menetelmät

Epäsuorilla menetelmillä arvioidaan betonin pakkasenkestävyyttä huokosrakenteen kautta. Epäsuorien menetelmien mitattava suure voi olla esimerkiksi suojahuokossuhde tai huokosjako. Menetelmien luotettavuus betonin pakkasenkestävyyden arvioinnissa on kuitenkin alhaisempi kuin jäädytys-sulatusmenetelmillä.

Vedellä imeytys- ja kyllästyskokeet ovat betonin pakkasenkestävyyden arvioinnin suosittuja epäsuoria menetelmiä. Tutkimusmenetelmät perustuvat siihen, että suojahuokokset pysyvät ilmatäyteisinä veden imeytyessä betoniin. Punnitsemalla eri tavoin vedellä imeytettyjä tai kyllästettyjä näytteitä määritetään betonin suojahuokossuhdetta. Suojahuokossuhteen avulla voidaan arvioida betonin pakkasenkestävyyttä.²⁷⁹



Kuva 37. Kuvassa on esitetty suojahuokosten toimintaperiaate, johon perustuvat vedellä imeytys- ja kyllästysmenetelmien toiminta ja mittaus. Pintajännityksen takia vesi ei imeydy suojahuokosiin, jotka pysyvät ilmatäyteisinä (Suomen Betoniyhdistys ry. 2018, 118).

Betonin suojahuokossuhde voidaan mitata monilla eri laboratoriokoemenetelmillä. Esimerkiksi Suomessa paljon käytetyssä *tyhjäkyllästyskokeessa* huokosten täyttö tapahtuu alipaineen avulla. Toisessa tunnetussa koemenetelmässä, joka on *kapillaarinen vedellä imeytys koe*, sovelletaan standardin SFS-EN 15801 koeasetelmaa.

Suojahuokossuhdetta määritetään betoninäytteille, joiden minimipaksuus on 5 mm²⁸⁰. Suojahuokossuhteen lisäksi monilla vedellä imeytys- ja kyllästysmenetelmillä saadaan selville muitakin tietoja betonin huokosrakenteesta. Esimerkiksi kapillaarisella vedellä imeytys kokeella voidaan selvittää vedenimun nopeutta eri vaiheissa ja kapillarieteettilukua, jonka avulla voidaan tutkia betoninäytteiden huokosten laatua.²⁸¹

²⁷⁹ Suomen Betoniyhdistys ry. 2002, 105–106

²⁸⁰ SFS-EN 15801

²⁸¹ Kuosa & Vesikari 2000, 50–62

6 Kokeellinen osio

Tässä osiossa tutkitaan kokeellisesti historiallisten betonien ominaisuuksia kahden case-kohteen avulla. Lisäksi kokeellisen tutkimuksen pohjalta tutkitaan tutkimusmenetelmien soveltuvuutta historiallisten betonien tutkimiseen. Kokeellisen tutkimuksen case-kohteet ovat Senaatti-kiinteistöiden omistamat Säätytalon suihkulähde ja Kansallisarkiston balusterikaide. Molemmat rakennelmat valmistuivat 1800-luvun lopussa, joten ne sopivat diplomityön rajaukseen.

6.1 Historiallisten betonien tutkimusmenetelmien kartoitus

Ennen case-kohteiden tutkimussuunnitelman laatimista kartoitettiin tutkimusmenetelmiä, joita käytetään yleensä historiallisten betonien kuntoarvioinnissa. Kartoituksen otanta koostui 16 historiallisten betonirakenteen tutkimusraporteista, joista ovat 11 kantavien betonirakenteiden tutkimusraportit ja 5 betonisten koriste-elementtien tutkimusraportit.

Tutkimusmenetelmien kartoituksessa käytettiin seuraavien historiallisten kantavien betonirakenteiden tutkimusraportteja:

- Suomenlinnan bastionin Polhemin lattia (1895)²⁸²
- Hangon sataman Huokausten silta (1905)²⁸³
- Hangon sataman Englannin makasiinin ulkoseinä (1907)²⁸⁴
- Kansallismuseon tornin välipohjat (1910)²⁸⁵
- Västanfjärdin uuden kirkon kellotornin betonimuuri (1912)²⁸⁶
- Helsingin päärautatieaseman kellotornin kellarihuoneen seinät ja katto (1914)²⁸⁷
- Helsingin päärautatieaseman pääsisäänkäynnin katoslippa (1914)²⁸⁸
- Helsingin päärautatieaseman itäisen sisäänkäynnin katto (1914)²⁸⁹
- Suomenlinnan vanhan levyhallin pilasteri (1917)²⁹⁰
- Savitaipaleen kirkon kiviseinän betonitausta (1924)²⁹¹
- Paimion sairaalan ruusukellarin holvikatto (1930)²⁹²

Tutkimusmenetelmien kartoituksessa käytettiin seuraavien historiallisten betonisten koriste-elementtien tutkimusraportteja:

- Johanneksen kirkon julkisivun koristeet (1891)²⁹³
- Helsingin kansalliskirjaston Rotunda-rakennuksen julkisivun reliefi (1905)²⁹⁴
- Helsingin kansalliskirjaston Rotunda-rakennuksen betonivalokset (1905)²⁹⁵
- Helsingin kansalliskirjaston Rotunda-rakennuksen julkisivun pilasteri (1905)²⁹⁶
- Helsingin kansalliskirjaston päärakennuksen julkisivun veistokset (1908)²⁹⁷

²⁸² Konov 2004

²⁸³ Konov 2003a

²⁸⁴ Konov 2003a

²⁸⁵ Insinööritoimisto Lauri Mehto Oy. 2014

²⁸⁶ Insinööritoimisto Lauri Mehto Oy. 2011

²⁸⁷ Insinööritoimisto Lauri Mehto Oy. 2016

²⁸⁸ Insinööritoimisto Lauri Mehto Oy. 2013

²⁸⁹ Insinööritoimisto Lauri Mehto Oy. 2013

²⁹⁰ Konov 2004

²⁹¹ Betonialan Ohuthiekeskus FCM Oy. 2009

²⁹² Konov 2003b

²⁹³ Helsingin seurakuntayhtymän keskusarkisto

²⁹⁴ Vahanen Oy. 2011

²⁹⁵ Winterhalter ym. 2014, liite 3

²⁹⁶ Winterhalter ym. 2014, liite 3

²⁹⁷ Vahanen Oy. 2011

Tässä diplomityössä kartoitettiin vain betoniominaisuuksien tutkimusmenetelmiä. Kartoituksen tulokset on esitetty taulukossa 6. Tutkimusmenetelmien lajittelussa käytettiin samaa lajitteluperiaatetta kuin luvussa 5. Tarkemmin tutkimusmenetelmät on esitetty liitteessä 2.

Kartoituksen perustella historiallisten betonien kuntoarvioinnissa käytetään usein optisia menetelmiä. Optisista menetelmistä käytetyin on ohuthieanalyysi. Tätä menetelmää käytettiin kaikkien 16 korjauskohteen tapauksissa. Pyyhkäisyelektronimikroskooppianalyysiä käytettiin vain 5 korjauskohteen tapauksissa ja pintahieanalyysiä ei ole käytetty ollenkaan. Kartoituksen perustella historiallisten betonien kuntoarvioinnissa määritetään harvoin puristus- ja vetolujuuksia sekä pakkasenkestävyyttä suorilla menetelmillä.

Taulukko 6. Historiallisten betonirakenteiden tutkimusmenetelmien kartoituksen tulokset. Taulukosta käy ilmi, että optisia menetelmiä käytetään eniten historiallisten betonirakenteiden kuntoarvioinnissa ja puristuslujuutta mitoitetaan harvemmin.

	Optiset menetelmät	Kemialliset menetelmät	Röntgensäteilyyn pohjautuvat menetelmät	Termoanalyttiset menetelmät	Puristuslujuuden määrittämisen menetelmät	Vetolujuuden määrittämisen menetelmät	Betonin pakkasenkestävyyden tutkimisen suorat menetelmät	Betonin pakkasenkestävyyden tutkimisen epäsuorat menetelmät	Muut menetelmät
Kantavat rakenteet	11	5	5	0	0	3	0	8	5
Koriste-elementit	5	2	1	2	1	0	0	1	0
Yhteensä	16	7	6	2	1	3	0	9	5

6.2 Case-kohteiden tutkimusmenetelmät

Case-kohteiden betonien kuntoarviossa noudatettiin luvussa 5.1 esitettyä historiallisten betonirakenteiden yleistä kulkua. Molemmissa case-kohteiden tapauksissa pyrittiin tutustumaan alkuperäisiin rakennusasiakirjoihin ja edellisiin korjausasiakirjoihin sekä tekemään silmämääräistä kuntoarviota tai kuntoselvitystä. Näiden tutkimusmenetelmien kulkua käsitteellään case-kohtaisesti luvuissa 6.3 ja 6.4.

Case-kohteiden betonitutkimuksilla oli tavoite selvittää betonien ominaisuuksia, joiden mukaan voitaisiin suositella korjausmenetelmiä ja korjausbetonia. Asetetun tavoitteen lisäksi tutkimusmenetelmien valintaan vaikutti betoninäytteiden määrän rajaaminen kansainvälisen standardin SFS-EN 16085 nojalla. Ottaen huomioon tavoitteen ja rajauksen päädyttiin käyttämään mikrorakennetta määrittäviä laboratoriomenetelmiä. Kirjallisuuskatsauksen perustella nämä menetelmät osoittautuivat tehokkaiksi keinoiksi selvittää betonien ominaisuuksia. Lisäksi mikrorakennetta tutkivien laboratoriomenetelmien näytetarve on suhteellisen pieni. Tämän takia poranäytteiden määrä pystyttiin vähentämään yhteen näytteeseen tutkittava rakenneosaa kohden.

Betoninäytteiden mikrorakennetutkimusta varten asetettiin uusia tavoitteita. Tavoitteena oli selvittää betonien:

- sideainetyyppi,
- seossuhde,
- lisäaineiden tyyppi,
- kiviainesten maksiminraekoko ja laatu,
- huokosrakenne,
- ja kunto.

Tavoitteiden saavuttamiseksi päädyimme tutkimuskeskuksen Eurofins Expert Services asiantuntijoiden kanssa alla esitettyyn tutkimussuunnitelmiin. Laboratoriotutkimustuloksia analysoidaan case-kohtaisesti luvuissa 6.2 ja 6.3.

Betoninäytteiden *mikrorakennetta ja kuntoa* tutkittiin optisesti ohuthieanalyysillä standardia ASTM C856 ja NT Build 381 soveltaen. Ohuthienäytteiden koko oli noin 30 mm x 50 mm x 0,025 mm. Ohuthieanalyysissä käytettiin Leica DM LP –polarisaatio- ja fluoresenssimikroskooppia ja Leica DFC 420C –mikroskooppikameraa. Ohuthieanalyysillä arvioitiin betoninäytteen sideainetyyppejä ja kuntoa; määritettiin lisäaineiden tyyppi, kiviainesten maksiminraekoko ja laatu sekä huokosrakennetta.

Ohuthienäytteiden valmistuksesta jääneet betoninäyteosat käytettiin muita tutkimuksia varten. Kaikista betoninäyteosista erotettiin silmämääräisen arvion perustella materiaali-kerroksia. Tämän jälkeen erotetut materiaalikerrokset kuivattiin lämpökaapissa, murskattiin ja jauhettiin pulveriksi.

Jauhettujen näytteiden *alkuainekoostumusta* määritettiin röntgenfluoresenssimenetelmällä (XRF) käyttäen Panalytical Axios mAX 3 kW –röntgenspektrometria ja puolikvantitatiivista Omnian –ohjelmaa. Näytteistä määritettiin yhteensä 79 alkuainetta määrittämisrajalla 0,01 %. Alkuaineen alkuainekoostumuksen perustella pyrittiin arvioimaan betoninäytteiden sideainetyyppejä. Lisäksi alkuainekoostumusta käytettiin avuksi betonien seossuhteiden määrittämisessä. *Betonien side- ja kiviainesosuuksia* määritettiin jauhettujen näytteistä kemiallisella menetelmällä.

Jauhettujen näytteiden *termistä käyttäytymistä* tutkittiin termogravimetrisellä analyysillä (TGA) käyttäen Mettler TGA/DSC 3+ -termovaakaa. Näytteitä lämmitettiin nopeudella 5 °C/min lämpötilaan 1000 °C. Termogravimetrisellä analyysillä määritettiin kalsiumhydroksidin ja kalsiumkarbonaatin pitoisuuksia, joilla arvioitiin karbonatisoitumisen etenemistä betoninäytteissä. Lisäksi alkuainekoostumusta käytettiin avuksi betonien seossuhteiden määrittämisessä.

Jauhettujen näytteiden *mineraalikoostumusta* määritettiin röntgendifraktiomenetelmällä (XRD) käyttäen Philips X'Pert MPD –difraktiometriä. Mineraalikoostumuksen perustella määritettiin kiviaineksen laatua ja havaittiin sulfaattivaurioiden merkkejä, kuten hemihydraattia, ettringiittiä ja kipsiä.

6.3 Case-kohde I: Säätytalon suihkulähde

6.3.1 Historia

Säätytalo on Karl Gustaf Nyströmin suunnittelema arvorakennus Snellmaninkadulla Helsingissä. Rakennus valmistui vuonna 1891.²⁹⁸ Suihkulähde sijaitsee Säätytalon takana olevassa säätytalonpuistossa. Säätytalon suihkulähteen rakennusajankohta ei ole tiedossa. Arvioidaan, että suihkulähde on rakennettu Säätytalon valmistumisen jälkeen 1890-luvulla arkkitehdin Gustav Nyström suunnitelmilla²⁹⁹. Ensimmäinen valokuva Säätytalon suihkulähteestä löytyy vuodelta 1907. Suurenus tästä valokuvasta on esitetty kuvassa 38.

Säätytalon suihkulähde on perusmuodoltaan pyöreä ja materiaaliltaan betonirakenteinen. Suihkulähde koostuu maanalaisesta kammioista ja maanpäällisestä osasta. Suihkulähteen

²⁹⁸ Senaatti 2

²⁹⁹ Helsingin Sanomat 7.8.1976

maanpäälliseen osaan kuuluvat kuusi erikokoista vesialtaista. Suihkulähteen julkisivua koristelevät runsaslukuiset betoniset koriste-elementit, jotka ovat pääosin humoristisia ja ilkkurisia eläinten naamoja.



Kuva 38. Vuoden 1907 valokuvassa näkyy Säätytalon suihkulähteen idänpuoleinen julkisivu. Tämä valokuva on ensimmäinen suihkulähteen kuvatodiste. Valokuvan perustella suihkulähteen muoto ja osa koristeista on säilynyt nykypäivän asti (Helsingin kaupunginmuseo 1, kuvankäsittely tekijän).



Kuva 39. Suihkulähteen idänpuoleinen koristeryhmä vuoden 1976 valokuvassa. Valokuvan perustella oikeapuoleisen veistoksen pää tuhoutui ennen vuotta 1976. Lehtiartikkelin mukaan suihkulähteen kunto vuonna 1976 oli huono: pinnassa paljon lohkeamia ja irronneita palasia (Helsingin Sanomat 7.8.1976).

Säätytalon suihkulähdettä korjattiin edellisen kerran vuonna 1991. Korjauksen toimenpiteistä on säilynyt vuoden 1990 alustavaa työselostus. Selostuksessa korjaustavat käsiteltiin yleisellä tasolla. Muita vuoden 1991 korjausasiakirjoja ei ole saatavilla.

Silmämääräisen arvion perustella voidaan päätellä, että suihkulähdettä on korjattu tämän lisäksi vielä muutamaa kerran aikaisemmin. Muita korjausasiakirjoja ei ole kuitenkin saatavilla, samoin kuin alkuperäisiä rakennussuunnitelmia. Säätytalon rakennus- ja korjausasiakirjojen puute vaikeutti kuntotutkimusohjelmaan suunnittelua.

6.3.2 Näytteenotto

Säätytalon suihkulähteen näytteenottopaikkoja päätettiin silmämääräisen kuntoselvityksen perustella. Silmämääräisessä kuntoselvityksessä kävi ilmi suihkulähteen yleinen kunto ja yleisimmät vauriotyypit. Säätytalon suihkulähteen julkisivun silmämääräinen kuntoselvitys on osa diplomityön suoritusta. Silmämääräisen kuntoselvityksen raportti on esitetty liitteessä 3.

Silmämääräisen kuntoselvityksen raportin perustella betoninäytteet päätettiin ottaa itäpuolisesta julkisivusta, joka on vähemmän näkyvissä Säätytalosta päin ja eniten rappeutunut. Lisäksi itäpuolinen julkisivu esiintyy monissa vanhoissa valokuvissa. Tämän johdosta aikaisempien korjausten jälkien havaitseminen itäpuolisessa julkisivussa on helpompaa kuin muiden julkisivujen kohdalla. Näytteenottopaikat sovittiin Senaatti-kiinteistöiden edustajan kanssa.

Halkaisijalta 50 mm betoninäytteet otettiin poraamalla. Näytteiden poraamissyvyys oli keskimäärin 70 mm. Näytteenottopaikat on esitettyä kuvassa 40. Betoninäytteet otettiin seuraavista rakenneosista:

- itäpuolisen koristeryhmän oikeanpuolisen veistos (SL-A),
- itäpuolisen koristeryhmän sivuvesialtaan sokkeli (SL-B),
- betonipilarin V11 etupuoli (SL-C).



Kuva 40. Säätytalon suihkulähteen näytteenottopaikat. Itäjulkisivuprojektio ja itäpuolisen koristeryhmän oikeanpuolen projektio.

6.3.3 Tutkimustulosten analyysi

Tässä luvussa esitetään ja analysoidaan Säätytalon suihkulähteen betoninäytteiden tutkimustuloksia, jotka pohjautuvat tutkimuskeskuksen Eurofins Expert Services tutkimusraporttiin EUFI29-19000245-T1. Tutkimusaineiston analyysissä käytetään avuksi kirjalli-

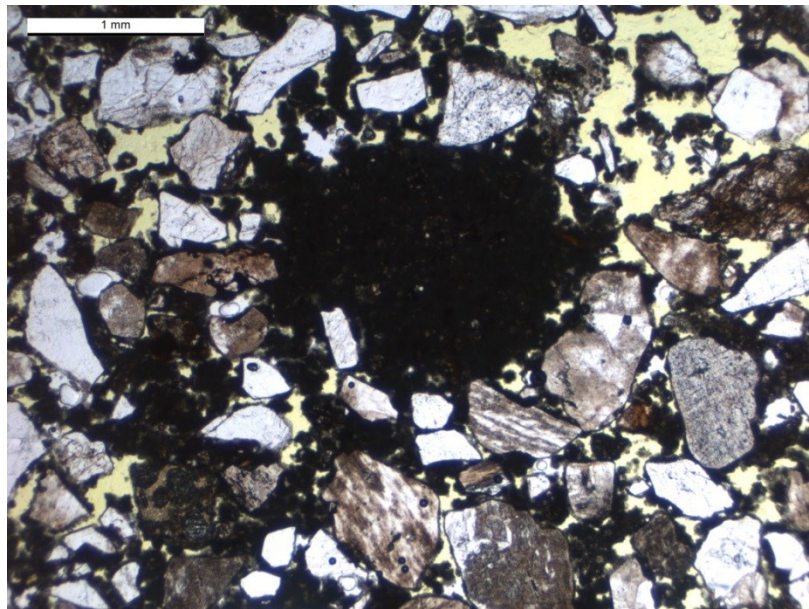
suuskatsauksen tietoja. Tässä työssä käsitellään vain betoninäytteiden pohjakerroksia, koska ne edustavat betonirakenteiden varsinaisia rakennusmateriaaleja

Säätytalon suihkulähteen betoninäytteiden sideainetyypin ja seossuhteiden määrittämisen tulokset on koottu taulukkoon 7. Kaikkien kolmen näytteen sideainetyyppi on määritetty sementiksi. Kaikissa näytteissä on havaittu reagoimattomia sementtipartikkeleja. Koristeryhmän veistoksen (SL-A) näytteessä havaittiin vähemmän reagoimattomia sementtipartikkeleita kuin muissa suihkulähteen näytteissä. Tämä viittaa koristeryhmän veistoksen betonin sideaineen korkeampaan hydrataatioasteeseen.

Taulukko 7. Säätytalon suihkulähteen sideainetyypin tutkimustulokset. Seossuhteet on ilmoitettu muodossa kalkki/sementti/kiviaines (Eurofins Expert Services 2019 pohjalta).

Näytteen tunnus	Tarkennus	Sideainetyyppi + seos- ja lisäaineet	Seossuhteet K/S/H	Reagoimattomat sideainepartikkelit
SL-A pohjakerros	koristeryhmän veistos	sementti	0/1/2	vähän
SL-B pohjakerros	koristeryhmän sivuvesiallas	sementti	0/1/1,5	yleisesti
SL-C pohjakerros	betonipilari	sementti + kalkki	1/1/7	yleisesti

Betonipilarin (SL-C) näytteessä todettiin lisättyä kalkkia. Kalkin pitoisuus on lähes sama kuin sementin pitoisuus, mikä on 1900-luvun alkupuolen betonioppaan mukainen suositus. Näytteessä havaitut sekoittamattomat kalkkimuodostumat ovat halkaisijaltaan jopa 4 mm (kuva 41). Säätytalon suihkulähteen betoninäytteistä ei löydetty muita seos- tai lisäaineita.

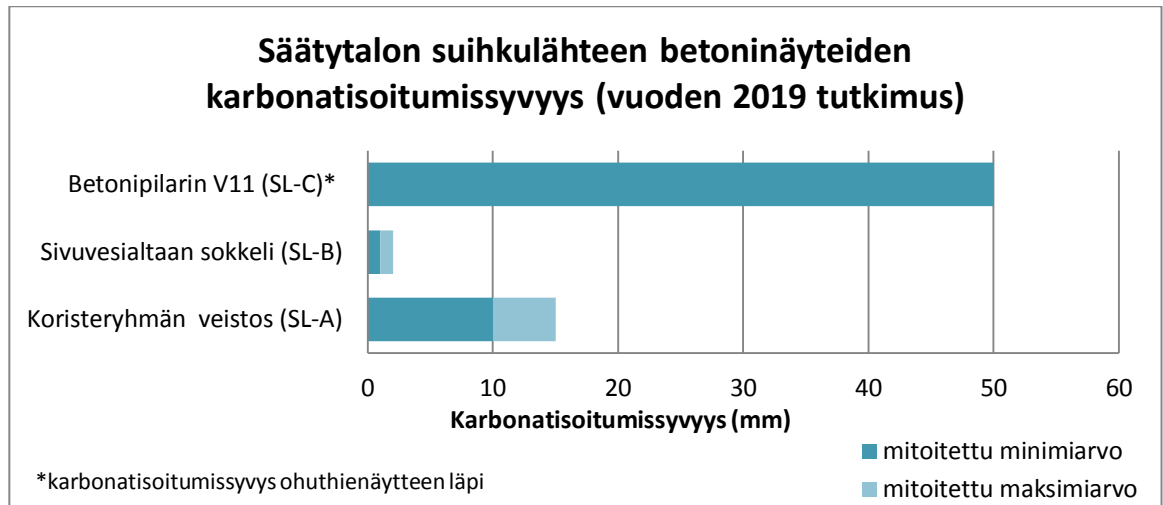


Kuva 41. Betonipilarin (SL-C) näytteen mikroskooppikuvan keskellä on nähtävissä tumma alue, joka on sekoittumaton kalkkimuodostuma (Eurofins Expert Services 2019).

Koristeryhmän veistoksen (SL-A) ja sivuvesialtaan (SL-B) näytteiden sementtimäärät ovat suuria. Näiden näytteiden seossuhteet vastaavat ulkoilman rasituksille alttiin betonirakenteiden seossuhteiden suositusta, joka esitettiin 1800-luvun loppupuolen ja 1900-luvun alkupuolen betonioppaissa. Betonipilarin (SL-C) näytteen sementtimäärä on pieni.

Säätytalon suihkulähteen betoninäytteiden karbonatisoitumisvyyden määrittämisen tulokset ovat esitettynä kuvassa 42. Karbonatisoitumisvyyden vaihtelu eri näytteissä on

suuri. Sivuvesialtaan sokkelin näytteen (SL-B) karbonatisoitumisvyvyys on vain muuttama millimetriä. Toisaalta betonipilarin näytteen (SL-C) karbonatisoitumisvyvyys on yli 50 mm ohuthiesta mitoitettuna.



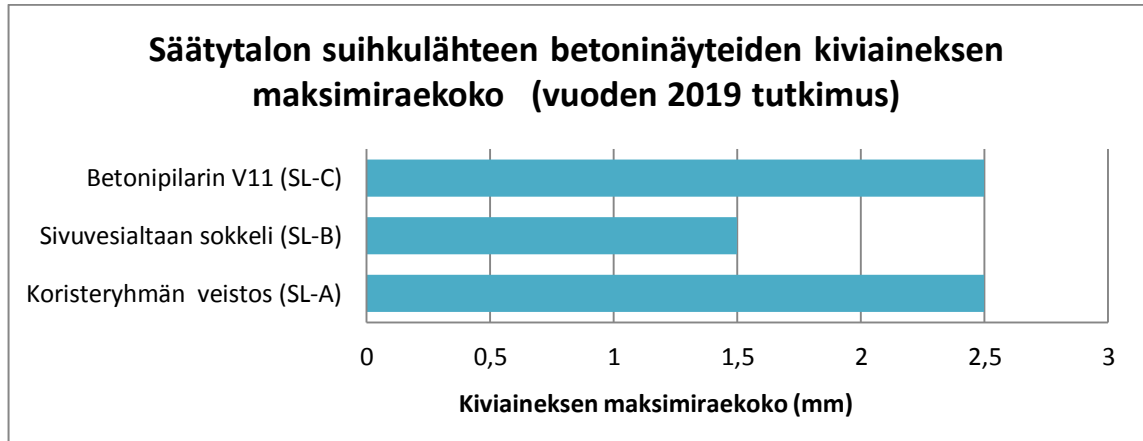
Kuva 42. Vuoden 2019 tutkimuksessa mitoitettut Säätytalon suihkulähteen betoninäytteiden karbonatisoitumisvyvydet. (Eurofins Expert Services 2019 pohjalta).

Säätytalon suihkulähteen näytteiden kalsiumhydroksidi- ja kalsiumkarbonaattipitoisuudet ovat esitettynä taulukossa 8. Pitoisuudet kertovat karbonatisoitumisprosessin etenemisestä betoninäytteissä. Tulosten mukaan ainoastaan betonipilarin näytteessä (SL-C) karbonatisoitumisprosessi eteni loppuun asti, koska näytteen kalsiumhydroksidipitoisuus on lähes nolla. Muissa kahdessa näytteessä kalsiumhydroksidipitoisuudet ovat nolasta suurempia. Lisäksi koristeryhmän veistoksen (SL-A) ja sivuvesialtaan (SL-B) näytteiden kalsiumkarbonaattipitoisuudet ovat noin 3-4 kertaa pienempiä kuin betonipilarin (SL-C) näytteen kalsiumkarbonaattipitoisuus. Tämä johtuu todennäköisesti betonipilariin (SL-C) lisätyn kalkin karbonatisoitumisesta.

Taulukko 8. Vuoden 2019 tutkimuksessa mitoitettut suihkulähteen betoninäytteiden kalsiumhydroksidi- ja kalsiumkarbonaattipitoisuudet (Eurofins Expert Services 2019 pohjalta).

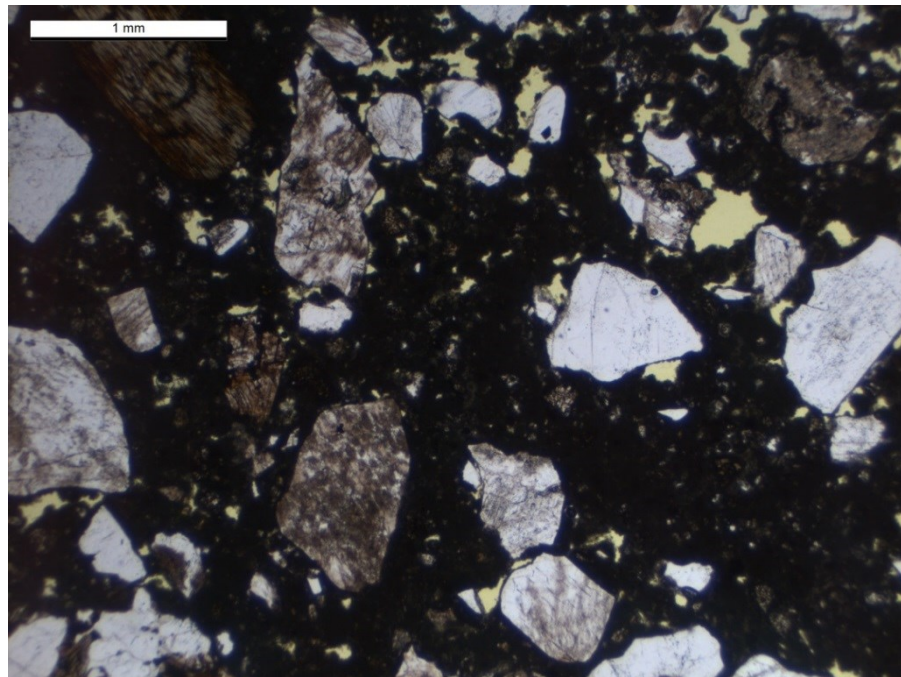
Näytteen tunnus	Tarkennus	Ca(OH) ₂ p-%	CaCO ₃ p-%
SL-A pohjakerros	koristeryhmän veistos	3,5	4,0
SL-B pohjakerros	koristeryhmän sivuvesiallas	1,5	6,3
SL-C pohjakerros	betonipilari	~0	17,2

Säätytalon suihkulähteen näytteiden kiviaines koostuu alle 2,5 mm rakeisesta hiekasta. Kiviainesrakeiden muoto on pääosin pyöristynyt. Kiviaines koostuu pääosin graniittisista kivilajeista. Laajasti esiintyy kvartsi- ja maasälpämineraaleja. Sivuvesialtaan sokkelin (SL-B) näytteestä havaittiin kvartsi- ja maasälpämineraalien lisäksi gneissimäisiä kivilajikappaleita sekä kille- ja amfibolimineraaleja. Säätytalon suihkulähteen näytteiden kiviaines on hyvälaatuinen ja Suomen aluelle tyypillinen. Kiviaines on todella hienorakeinen, millä todennäköisesti pyritti parantamaan betonin säärasitusten kestävyyttä. Lisäksi monimutkaisten koriste-elementtien, kuten koristeryhmän veistoksen, valamiseen hienorakeinen kiviaines sopii parhaiten.

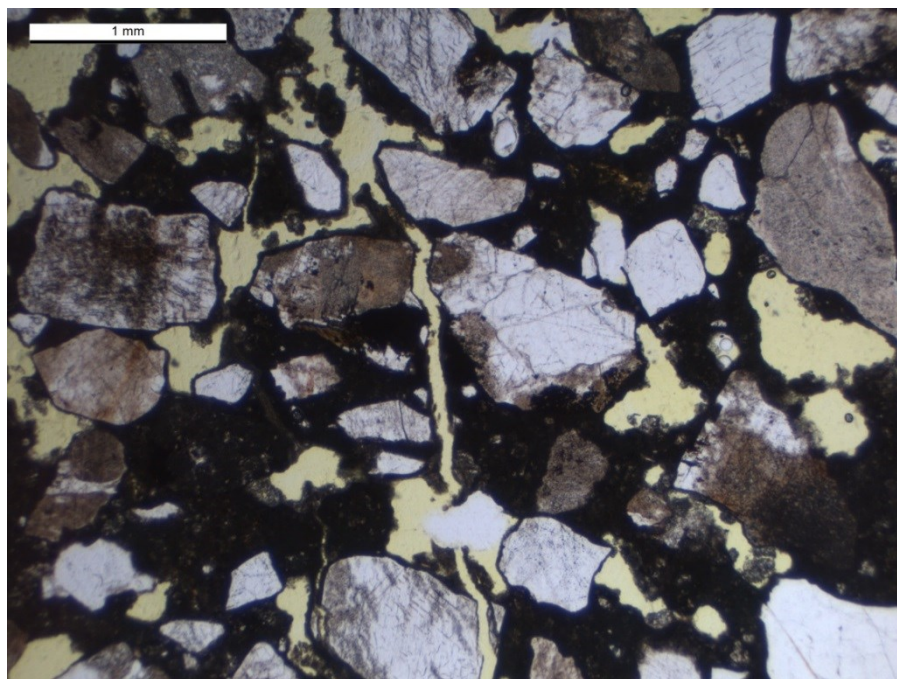


Kuva 43. Vuoden 2019 tutkimuksessa mitoitettu Säätytalon suihkulähteen betoninäytteiden maksimiraekoko (Eurofins Expert Services 2019 pohjalta).

Koristeryhmän veistoksen (SL-A) näytteen rakenne on melko tiivis (kuva 44). Erimuotoisia ja erikokoisia huokosia on erittäin vähän. Sivualtaan sokkelin (SL-B) ja betonipilarin (SL-C) näytteiden huokosrakenne on paljon muodolta epämääräisiä, keskikokoisia huokosia, jotka jakautuvat näytteissä vähän epätasaisesti. Sivualtaan sokkelin (SL-B) ja betonipilarin (SL-C) näytteiden huokosrakenne voi viitata jonkin asteiseen puutteellisuuteen betonin tiivistyksessä.

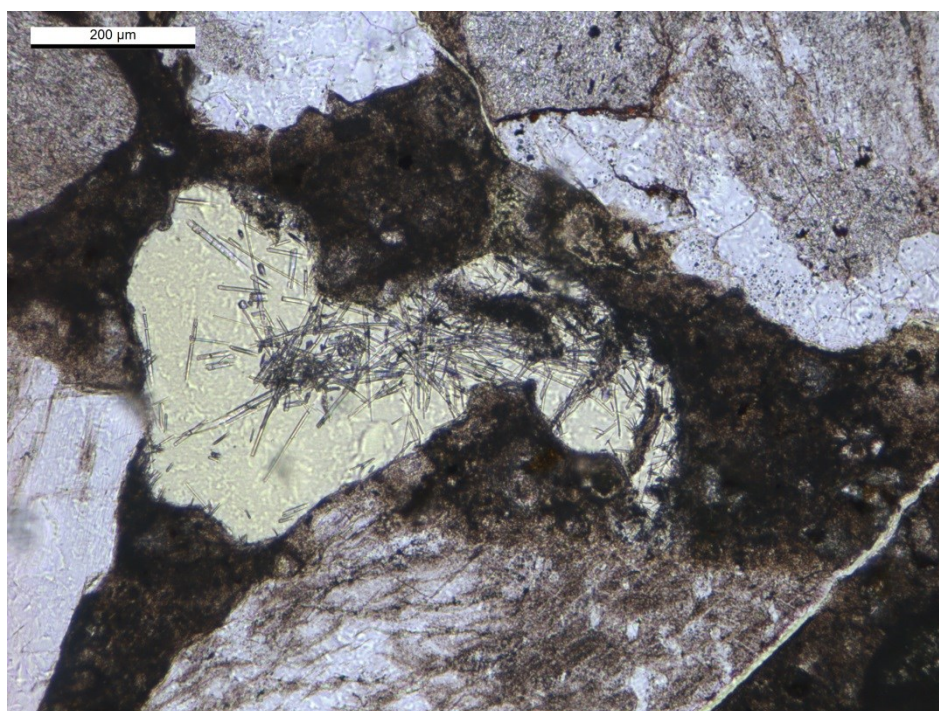


Kuva 44. Ohuthieanalyysin mikroskooppikuva Säätytalon suihkulähteen koristeryhmän veistoksen (SL-A) näytteen pohjakerroksesta. Pohjakerroksen rakenne on varsin tiivis. Sideine on kuvassa tumman värinen, kiviaines on vaalean värinen ja huokokset ovat keltaisia (Eurofins Expert Services 2019).



Kuva 45. Ohuthieanalyysin mikroskooppikuva Säätytalon suihkulähteen sivualtaan sokkelin (SL-B) mikrohalkeamista. Molemmat mikrohalkeamat ovat samansuuntaisia ja jatkuvat koko näytteen läpi (Eurofins Expert Services 2019).

Olettavasti pakkasenrapautumisen seurauksena muodostuneita pitkiä säröjä havaittiin vain sivuvesialtaan sokkelin (SL-B) näytteen rakenteesta (kuva 45). Koristeryhmän veistoksen (SL-A) näytteen rakenteesta havaittiin yleisesti mikrosäröilyä, joka on seurausta kuivumiskutistumisesta. Betonipilarin (SL-C) näytteen rakenteesta ei havaittu merkittävää säröilyä. Kaikissa näytteissä esiintyy pieniä määriä hemihydraattia ja ettringiittiä (kuva 46). Lisäksi koristeryhmän veistoksen (SL-A) näytteestä mitoitettiin pieniä määriä kipsiä. Betonin näytteissä ei kuitenkaan havaittu merkittäviä sulfaattivaurioiden merkkejä.



Kuva 46. Ohuthieanalyysin mikroskooppikuva Säätytalon suihkulähteen sivualtaan sokkelin (SL-B) näytteestä. Kuvan keskellä oleva huokonen on täynnä ettringiittiä (Eurofins Expert Services 2019).

6.3.4 Vertailu aikaisempaan tutkimukseen

Tässä luvussa vertaillaan tutkimuskeskuksen Eurofins Expert Services saamia Säätytalon suihkulähteen betoninäytteiden tutkimustuloksia aikaisempiin tutkimustuloksiin. Aikaisemman suihkulähteen kuntotutkimuksen suoritti Insinööritoimisto Lauri Mehto Oy vuoden 2018 kesällä. Kuntotutkimus sisälsi suihkulähteen silmämääräistä kuntoselvitystä, kenttätutkimuksia ja 9 poranäytteiden laboratoriotutkimuksia. Laboratoriotutkimuksia varten betoninäytteet otettiin pääosin suihkulähteen sisäpuolen kammion betonirakenteista kuten seinistä ja kattorakenteista. Yksi näyte otettiin suihkulähteen ulkopuolelta julkisivun sokkelista.

Vuoden 2018 kenttätutkimuksilla määritettiin betoniterästen etäisyyksiä betonin pinnasta ja betonin peitepaksuusjakamaa. Laboratoriotutkimuksilla määritettiin betoninäytteiden suojahuokossuhdetta, vetolujuutta, karbonatisoitumisvyötyä ja kloridipitoisuutta. Lisäksi kolmen betoninäytteen mikrorakennetta tutkittiin ohuthieanalyysillä Ohuthiekeskus Oy:n laboratoriossa. Ohuthieanalyysillä tutkittiin suihkulähteen kammion rakenteista otettuja näytteitä, joiden olosuhteet eroavat vuoden 2019 tutkimusta varten julkisivun betonirakenteista otettujen näytteiden olosuhteista. Olosuhteiden erot pitää ottaa huomioon tutkimustulosten vertailussa.

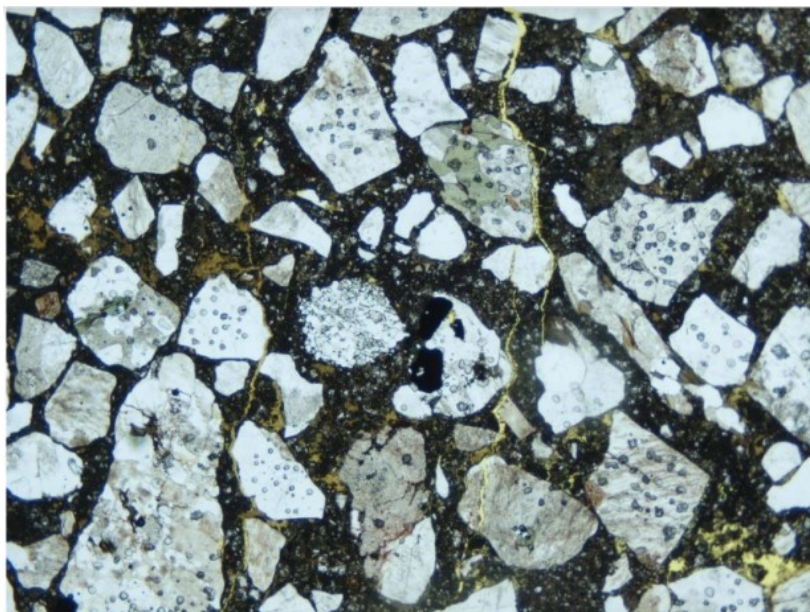
Taulukko 9. Säätytalon suihkulähteen sideainetyypin tutkimustulokset vuodelta 2018 (Ohuthiekeskus Oy, 2018 pohjalta)

Näytteen ottoipaikka	Sideainetyyppi + seos- ja lisäaineet	Reagoimattomat sideainepartikkelit
kammion katon ruode	karkearakeinen sementti	runsaasti
kammion seinä	karkearakeinen sementti	runsaasti
kammion katto	sementti	vähän

Vuoden 2018 kuntotutkimuksessa säätytalon suihkulähteen kolmen betoninäytteen sideaineet määritettiin myös sementiksi ohuthieanalyysillä samoin kuin vuoden 2019 sideainetutkimuksessa. Vuonna 2018 kahden näytteen (kammion seinän ja katon ruoteen) betonien sideaineet määritettiin karkearakeisiksi, kun vuoden 2019 tutkimustuloksissa ei otettu kantaa sideaineen rakeiden kokoon. Sideaineen karkearakeisuus on tyypillinen ominaisuus historiallisille betoneille, mikä osoitettiin luvussa 4.3.

Kummassakin tutkimuksessa kaikissa betoninäytteissä havaittiin reagoimattomia sideainepartikkeleita. Reagoimattomien sideainepartikkeleiden suuri määrä on tyypillinen historiallisten betonien ominaispiirre, mikä osoitettiin luvussa 4.3. Vuoden 2018 betoninäytteet sisältävät pääosin runsaammin reagoimattomia sideainepartikkeleita kuin vuoden 2019 betoninäytteet. Koristeryhmän veistoksen (SL-A) näytteen sideaine eroaa eniten muiden näytteiden sideaineista. Tämä betoninäyte sisältää vähintään reagoimattomia sideainepartikkeleita ja sen hydrataatiotaso on poikkeuksellisesti korkea.

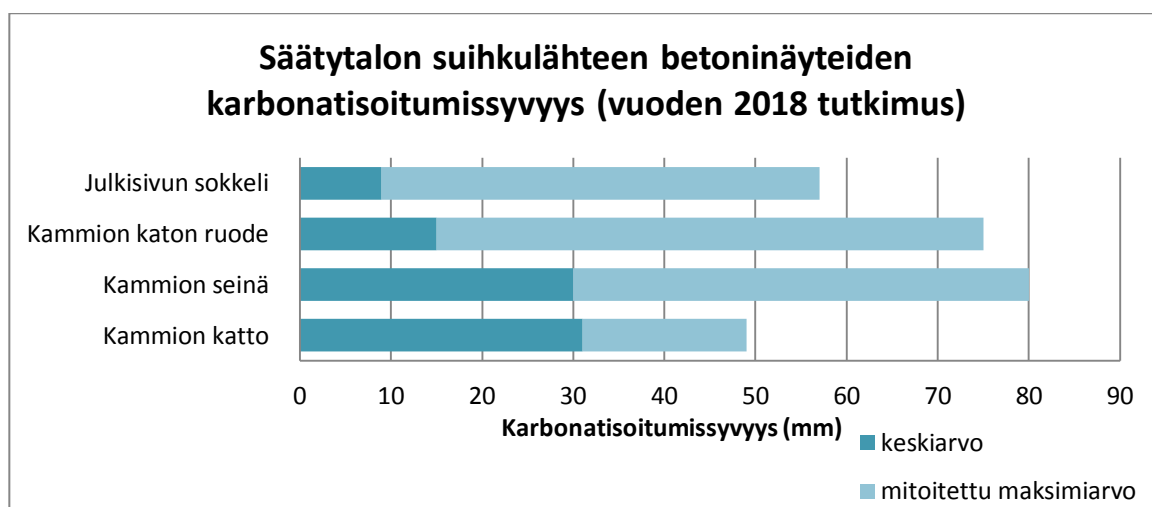
Vuoden 2018 tutkimuksessa Säätytalon suihkulähteen betoninäytteistä ei löydetty seos- tai lisäaineita kuten ei myöskään vuoden 2019 kahdessa betoninäytteessä. Betonipilarin (SL-C) näyte on ainoa suihkulähteen betoninäyte, jossa havaittiin kalkkia. Kahden tutkimustulosten perustelle kalkin käyttö lisäaineena on harvinaista suihkulähteen betonirakenteissa.



Kuva 47. Ohuthieanalyysin mikroskooppikuva Säätytalon suihkulähteen koton ruoteen betoninäytteen mikrohalkeamista. Mikroskooppikuvan pidemmän sivun pituus on 7,5 mm (Ohuthiekeskus Oy. 2018).

Molempien tutkimustulosten perustella suihkulähteen betoninäytteiden rakenne on pääosin huokoista. Sekä vuoden 2018 betoninäytteissä että vuoden 2019 näytteissä on harvakseltaan pallomaisia ilmahuokosia ja runsaasti epämääräisen muotoisia ilmahuokosia, jotka muodostuivat todennäköisesti puutteellisen tiivistyksen seurauksena. Poikkeus on koristeryhmän veistoksen (SL-A) näytteen rakenne, joka on paljon tiiviimpi kuin muiden näytteiden. Huokosrakenteen perustella suihkulähteen tutkitut betonit nykynormien mukaan eivät ole pakkasenkestäviä.

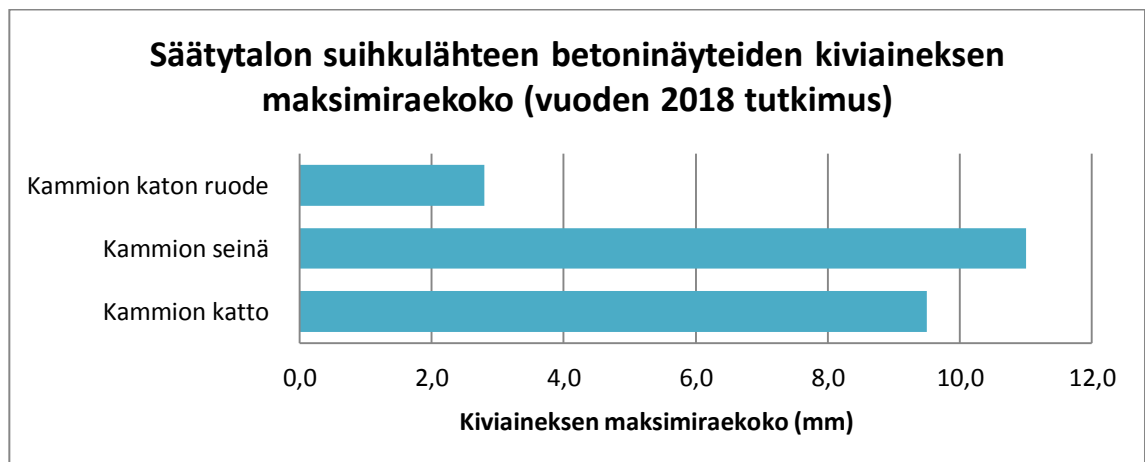
Kummankin tutkimustulosten perustella betoninäytteet ovat keskimäärin karbonatoituneet suhteellisen vähän, mikä johtuu todennäköisesti suuresta ja jatkuvasta kosteusrasituksesta. Kammion rakenteiden betoninäytteiden karbonatoitusmisyvydet ovat keskimäärin 25 mm. Arvo on suurempi kuin julkisivun rakenteiden betoninäytteiden karbonatoitusmisyvydet, jotka ovat keskimäärin 10 mm. Tämä johtuu todennäköisesti kammion rakenteiden pienimistä kosteusrasituksesta ja huokoisemmasta rakenteesta.



Kuva 48. Vuoden 2018 tutkimuksessa mitoitettut Säätytalon suihkulähteen betoninäytteiden karbonatoitusmisyvydet (Ohuthiekeskus Oy. 2018 pohjalta).

Tutkimustulosten vertailussa on otettava huomioon, että vuoden 2018 tutkimuksessa karbonatisoitumissyvyyydet määriteltiin fenoliftaleiini-indikaattorimenetelmällä, taas kun vuoden 2019 tutkimuksessa vain ohuthieanalyysillä. Fenoliftaleiini-indikaattorimenetelmällä tutkitaan betoninäytettä suuremalla pinta-alalla verrattuna ohuthieanalyysiin. Tästä syystä fenoliftaleiini-indikaattorimenetelmällä saadaan tarkempi käsitys karbonatisoitumissyvyydestä.

Lisäksi vuoden 2018 näyteotanta oli suurempi, joka osaltaan parantaa myös tutkimustulosten tarkkuutta. On mahdollista, että vuoden 2019 tutkimustulosten poikkeukselliset karbonatisoitumissyvytydet sivultaan sokkelin (SL-B) ja betonipilarin (SL-C) näytteissä johtuvat ohuthieanalyysin epätarkuudesta karbonatisoitumissyvyyden määrittämisessä. Tämän lisäksi betonipilarin (SL-C) näytteen suuri karbonatisoitumissyvyys voi johtua siitä, että betoni sisältää suuria määriä kalkkia.



Kuva 49. Vuoden 2018 tutkimuksessa mitoitettu Säätytalon suihkulähteen maksimiraekoko (Ohuthiekeskus Oy. 2018 pohjalta).

Vuoden 2018 suihkulähteen betoninäytteiden maksimiraekoko on pääosin suurempi kuin vuoden 2019 betoninäytteiden. Tämä ero johtuu tutkittavien betonirakennesien eri käyttötarkoituksesta ja koosta. Kantavien rakenteiden, kuten kammion seinän ja katon, betoninäytteiden kiviaineksen suurin raekoko on 9-11 mm. Arvo on suhteellisen pieni kantavien rakenteiden betoneille. Tämän lisäksi kantavien rakenteiden betoninäytteissä löydettiin suuria säästökiviä. Koriste-elementeissä ja muissa monimuotoisissa rakennesissa maksimiraekoko on 3 mm.

Vuoden 2018 betoninäytteiden kiviaines koostuu pääosin graniittisista kivirakeista samoin kuin vuoden 2019 näytteiden kiviaines. Kiviaineksen rakeiden muoto eroaa kuitenkin kahden tutkimustuloksen perustella. Vuoden 2018 betoninäytteissä kiviaineksen rakeet ovat muodoltaan pääosin särmikkäitä tai särmiltään pyöristyneitä, taas kun vuoden 2019 betoninäytteiden kiviaines on pääosin pyöristynyttä. Tämä voi johtua myös eri tahojen erilaisesta tavasta arvioida kiviaineksen laatua.

Tutkimuksissa havaittiin pakkasrapautuman ja sulfaattivaurioiden merkkejä. Vuoden 2018 tutkimuksen yhdessä betoninäytteessä esiintyy useita pakkasenrapautumisen seurauksena muodostuneita pitkiä säröjä. Lisäksi kahdessa betoninäytteessä esiintyy pieniä määriä etringiittiä.

6.3.5 Tutkimustulosten yhteenveto

Tutkimuskeskuksen Eurofins Expert Servis³⁰⁰ tutkijoiden mukaan ainoastaan betonipilarin (SL-C) näyte saattaa edustaa alkuperäistä betonia. Muiden näytteiden suuren kalsiumhydroksidipitoisuuden ja pienen karbonatisoitumissyvyyden perustella tutkijat epäilevät betonien olevaan aikaisintaan 1960-luvulta. Luvun 4.6 kirjallisuuskatsauksen tiedot osoittavat kuitenkin, että karbonatisoitumisprosessin etenemisen perustella ei voida luotettavasti määrittellä betonin ikää. Esimerkiksi sideainetyypin ja lisäainetyypin perustella betonin ikää voidaan arvioida luotettavammin.

Vuoden 2019 ja vuoden 2018 tutkimustulosten välissä ei löydetty olennaisia eroja. Kaikki luvussa 6.3.4 osoitetut erot voidaan selittää sillä, että suihkulähteen eri rakentamisenvaiheissa käytettiin vähän erilaisia raaka-aineita. Tämä ilmiö on tyypillistä 1800-luvun loppupuolen betonirakentamiselle. Tämä johtuu sideaineen vaihtelevasta saatavuudesta muista Eurooppaan mailta ja kalliista hinnasta. Asia on käsitelty luvuissa 2 ja 3. Lisäksi osa tutkimustulosten eroista voi johtua tutkimuslaitosten välisistä tulkintaeroista.

Silmämääräisen kuntoselvityksen perustella huomattiin, että eri rakennusvaiheissa käytettiin erilaisia raaka-aineita. Tämän lisäksi suihkulähteen silmämääräisessä kuntoselvityksessä ei löydetty näyteoton rakenneosista korjauksen merkkejä (esimerkiksi saumoja). Vanhat valokuvat myös osoittavat, että sivultaan sokkeli ja koristeryhmän veistokset eivät muuttuneet ulkonäöllisesti paljon 1900-luvun alussa.

Vaikka tutkimuskeskuksen Eurofins Expert Servis tutkijat toteavat, että betoninäytteet eivät edusta pääosin alkuperäistä historiallista betonia, tutkimusraportissa ei ole esitetty yksiselitteisiä ikäarvioinnin todisteita. Diplomityössä esitetyjen laboratoriotutkimustulosten ja silmämääräisen kuntoselvityksen analyysien perustella voidaan kuitenkin olettaa, että suurin osaa suihkulähteen rakenneosista ovat alkuperäisiä 1800-luvun rakenteita. Tutkimustulosten perustella ei pystytä luokittelemaan sementin tyyppiä luvun 3.1 historiallisen sementin lajittelun mukaisesti. Voidaan olettaa, että suihkulähteen sideaine on varhaista keinotekoista sementtiä tai historiallista portlandsementtiä. On hyvin todennäköistä, että aliitin pitoisuus sementeissä on pienempi verrattuna moderniin portlandsementtiin.

Kahden tutkimustulosten perustella suihkulähteen kammion betonirakenteiden ja julkisivun rakenneosien valmistuksessa käytettiin erilaisia betoneja. Julkisivun rakenneosien betonien valmistuksessa käytettiin hienorakeisempaa ja todennäköisesti laadunkampaa sementtiä kuin kammion rakenneosien. Voidaan myös olettaa, että suurella osalla suihkulähteen betonirakenteista ei ole käytetty mitään lisä- tai seosaineita.

Suihkulähteen betonien rakenne on pääosin huokoinen, mikä todennäköisesti johtuu puutteellisesta tiivistyksestä. Julkisivun koriste-elementtien betonit ovat rakenteelta tiiviimpiä. Suihkulähteen betonit eivät todennäköisesti ole nykynormien mukaan pakkasenkestäviä. Paikoittain on havaittu pakkasrapautuman ja sulfaattivaurioiden merkkejä.

Suihkulähteen betonirakenteiden karbonatisoitumissyvyys on keskimäärin 10–25 mm välissä. Karbonatisoitumissyvyyden suhtellisen pieni arvo johtuu todennäköisesti rakenteiden suuresta ja jatkuvasta kosteusrasituksesta. Suihkulähteen kiviaines koostuu pääosin graniittisista kivirakeista. Kiviaineksen raekokojakauma on tavanomainen ja kahden tutkimuksen perustella säätytalon kiviaineksen maksimiraekoko betoninäytteissä vaihtelee rakenneosien koon ja valmistustekniikan mukaan.

³⁰⁰ Eurofins Expert Services 2019

6.4 Case-kohde II: Kansallisarkiston balusterikaide

6.4.1 Historia

Kansallisarkisto sijaitse Säätytalon läheisyydellä Snellmaninkadun ja Rauhankadun risteyksellä. Kansallisarkiston rakennus valmistui vuonna 1890. Rakennuksen suunnitteli myös arkkitehti Karl Gustaf Nyström.³⁰¹ Balusterikaide valmistui todennäköisesti myös vuonna 1890. Ensimmäisen kerran balusterikaide on näkyvissä vuoden 1892 valokuvassa, joka on esitetty kuvassa 50.



Kuva 50. Vuoden 1892 valokuvassa näkyy Kansallisarkiston päärakennus ja sen takana, kuvan oikeassa laidassa balusterikaide muurin päällä (Åbo Akademi, kuvankäsittely tekijän).

Kansallisarkiston balusterikaide sijaitse Kansallisarkiston päärakennuksen takana Snellmaninkadun puolella. Balusterikaide on rakennettu kivimuurin päälle. Balusterikaide on betonirakenteinen ja koostuu 14 samantyyppisistä kaidevälistä, jotka yhdistyy balusterikaiderakenteeksi välitolpilla.

Kansallisarkiston balusterikaiteen rakennus- ja korjausasiakirjojen puute vaikeutti kunto- tutkimusohjelman suunnitteluun. Silmämääräisessä arvioinnissa havaittiin, että balusterikaiteen pinnalla on eriaikaisinten korjausten jälkiä. Jotkut balusterikaiteen osat uusittiin kokonaan aikaisemmissa korjauksissa.

On hyvin todennäköistä, että balusterikaiteen laajemmat korjaustyöt suoritettiin Kansallisarkiston laajennustöiden yhteydessä. Kansallisarkiston Snellmaninkadun laajennusosaa rakennettiin vuonna 1928. Laajennustöiden yhteydessä vanhoissa osissa tehtiin muutostöitä. Toisen kerran Kansallisarkiston laaja lisärakennus- ja muutostyöt toteutettiin vuosina 1968–72.³⁰²

³⁰¹ Senaatti 1

³⁰² Senaatti 1



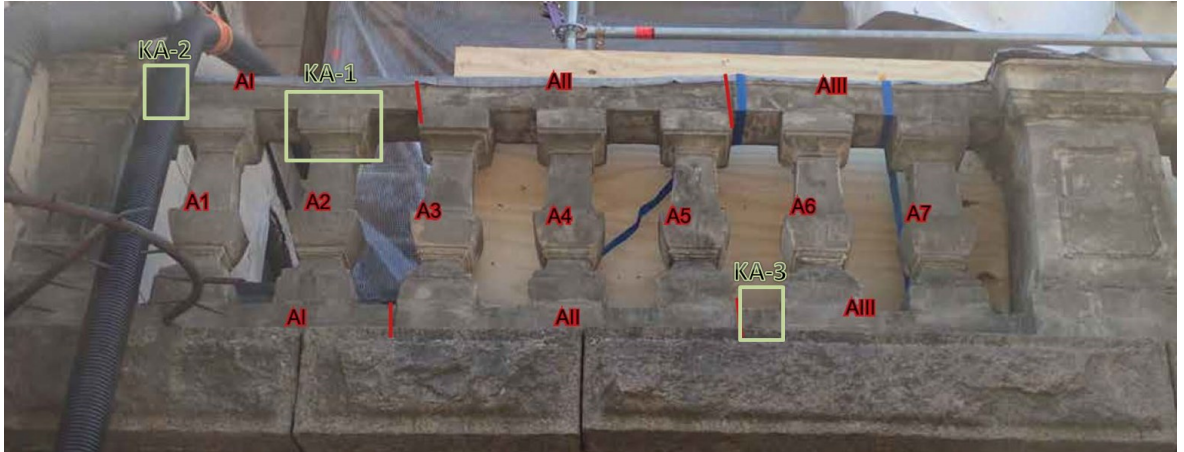
Kuva 51. Vuoden 1928 valokuvan suurennuksessa näkyy balusterikaide Kansallisarkiston ensimmäisen laajennuksen jälkeen. Balusterikaiteen muoto vastaa nykyistä muotoa (Museovirasto 2, kuvankäsittely tekijän).

6.4.2 Näytteenotto

Kansallisarkiston balusterikaiteen näytteenottopaikat päätettiin silmämääräisen kuntoarvion perustella. Silmämääräisen kuntoarvion teki Anni Hassi, joka on rakennusentisöintiliikkeen Ukri Oy restauroinnin ammattilainen. Silmämääräinen kuntoarvio tehtiin kahden ensimmäisen balusterikaiteen välien osittaisen purun yhteydessä. Kaksi ensimmäistä balusterikaiteen väliä siirrettiin rakennusentisöintiliikkeen Ukri Oy verstaalle Kansallisarkiston työmaan tieltä.

Kansallisarkiston balusterikaiteen näytteenottopaikkojen ehdotusta teki Anni Hassi ja ehdotuksen hyväksyi Senaatti-kiinteistöiden edustaja. Näytteitä otettiin ensimmäisestä balusterikaiteen välistä sahaamalla. Näytteenottopaikat on esitetty kuvassa 52. Betoninäytteet otettiin seuraavista kaiteen rakenneosista:

- balusterin yläosa (KA-1),
- yläpaarre (KA-2),
- alapaarre (KA-3).



Kuva 52. Kansallisarkiston balusterikaiden näytteenottopaikat. Ensimmäinen väli.

6.4.3 Tutkimustulosten analyysi

Tässä luvussa esitetään ja analysoidaan Kansallisarkiston balusterikaiteen betoninäytteiden tutkimustuloksia, jotka pohjautuvat tutkimuskeskuksen Eurofins Expert Services tekemiin tutkimuksiin vuoden 2019 alkupuolella. Tutkimustulokset on esitetty kokonaan tutkimusraporttiissa EUFI29-19000245-T1. Tutkimusaineiston analyysissä käytetään avuksi kirjallisuuskatsauksen tietoja.

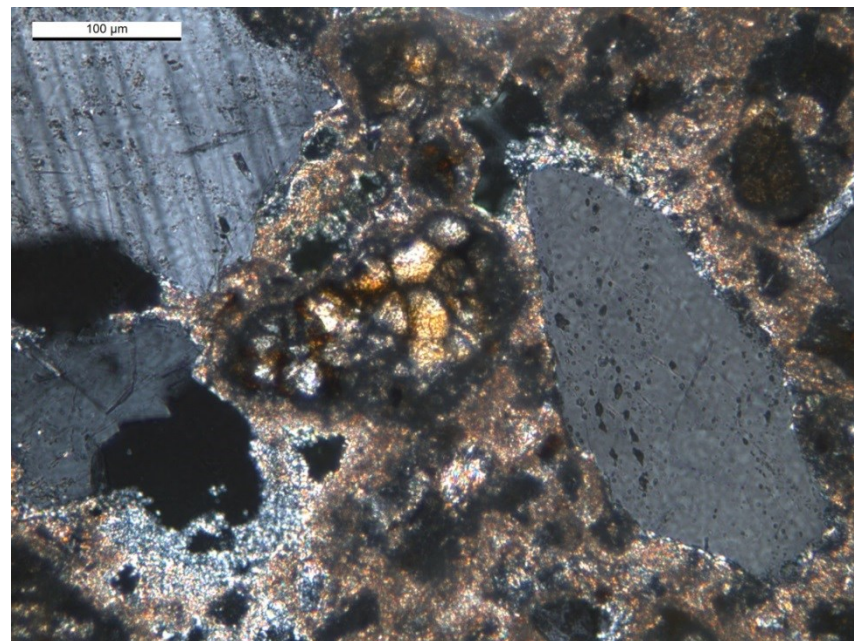
Tässä työssä käsitellään vain betoninäytteiden pohjakerroksia, koska ne edustavat betonirakenteiden varsinaisia rakennusmateriaaleja. Balusterin yläosan (KA-1) betoninäytteissä ohuthieanalyysillä havaittiin pohjakerroksen lisäksi noin 1,5 mm paksuinen pintakerros. Pinta- ja pohjakerrosten välissä havaittiin paikoin pieniä jäämiä ilmeisesti vanhemmasta pinnoitteesta. Muita tutkimusmenetelmiä varten kerroksia ei kuitenkaan erotettu toisistaan,

joka väristää jonkin verran tutkimustuloksia. Yläparteen (KA-2) näytteessä havaittiin visuaalisen tarkastellun perusteella neljä materiaalikerrosta, joista tässä työssä käsitellään kahta pohjakerrosta: m1 ja m2.

Taulukko 10. Kansallisarkiston balusterikaiteen sideainetyypin tutkimustulokset. Seossuhteet on ilmoitettu muodossa kalkki/sementti/kiviaines (Eurofins Expert Services 2019 pohjalta).

Näytteen tunnus	Tarkennus	Sideainetyyppi + seos- ja lisäaineet	Seossuhteet K/S/H	Reagoimattomat sideainepartikkelit
KA-1	balusteri	sementti + kalkki	0,8/1/4,5	vähän
KA-2 kerros m1	yläpaarre	sementti + lentotuhka + kalkki	0,05/1/2,9	-
KA-2 kerros m2	yläpaarre	sementti + kalkki	0,1/1/2,8	vähän
KA-3 pohjakerros	alapaarre	sementti	0/1/2,3	vähän

Kansallisarkiston balusterikaiteen betoninäytteiden sideainetyypin ja seossuhteiden määrittämisen tulokset on koottu taulukkoon 10. Kaikkien näytteiden sideaineen tyyppi on määritetty sementiksi. Tutkimusaineiston perustella ei pystytä luokittelemaan sementtityyppejä luvun 3.1 historiallisen sementin lajittelun mukaisesti.

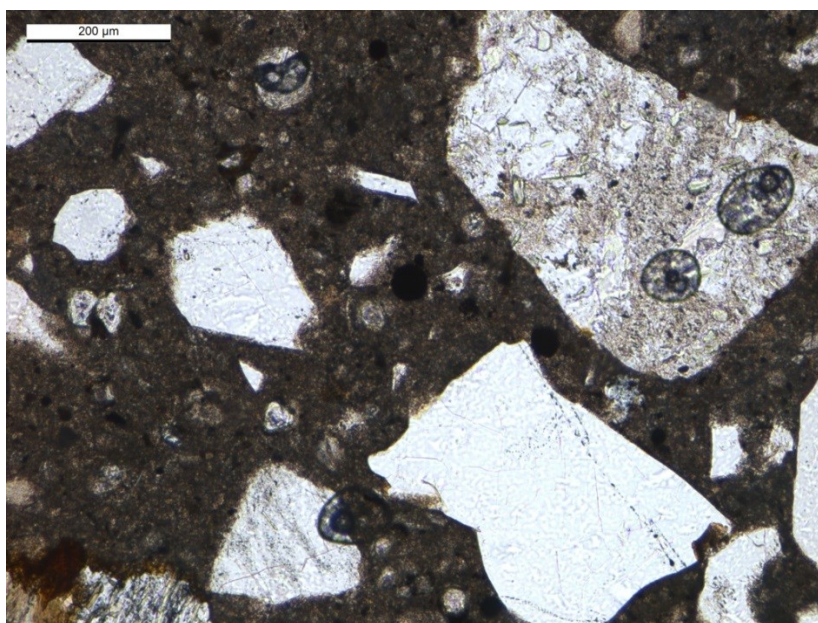


Kuva 53. Ohuthieanalyysin mikroskooppikuva kansallisarkiston balusterikaiteen alapaarteeseen (KA-3) näytteestä. Kuvan keskellä on reagoimaton sideainepartikkeli, jonka kokoluokka on noin 0,2 mm (Eurofins Expert Services 2019).

Balusterin (KA-1), yläparteen (KA-2 kerros m2) ja alapaarteeseen (KA-3) näytteistä havaittiin vähäisiä määriä reagoimattomia sideainepartikkeleja. Yläparteen (KA-2 kerros m1) toisessa näytteessä ei ole havaittu reagoimattomia sideainepartikkeleja ohuthieanalyysissä, mutta röntgendifraktiogrammin perustella näytteessä saata olla vähäisiä määriä reagoimattomia sideainemineraaleja. Alapaarteeseen (KA-3) näytteen reagoimatonta sideainepartikkeliä tutkittiin tarkemmin (kuva 53). Tämän sideainepartikkelin kokoluokka mikroskooppikuvaan määrättyä on noin 0,2 mm. Luvun 4.3 kirjallisuuskatsauksen mukaan suuri klinkkerin raekoko on tyypillistä historiallisille betoneille, kun taas modernin portlandsementin klinkkerin raekoko on keskimäärin 0,02 mm ja maksimissaan 0,09 mm.

Balusterin (KA-1) ja yläpaarteen (KA-2) näytteissä todettiin lisättyä kalkkia. Balusterin (KA-1) näytteen kalkin pitoisuus on lähes sama kuin sideaineen pitoisuus, mikä on 1900-luvun alkupuolen betonioppaan mukainen suositus. Tässä näytteessä on vähän sekoittamattomia kalkkiyhdistelmiä. Yläpaarteen (KA-2 kerrokset m1 ja m2) näytteen kalkin pitoisuus on alle 10 % sideaineen pitoisuudesta. Lisäksi molemmissa pohjakerroksissa ei havaittu sekoittamattomia kalkkiyhdistelmiä.

Yläpaarteen (KA-2 kerros m1) näytteestä löydettiin lentotuhkapartikkeleita (kuva 54). Lentotuhkan käytöstä betonin seosaineena ennen vuotta 1930 ei ole tietoja. Todennäköisesti lentotuhkaa alettiin käyttää betonin valmistuksessa vasta 1980-luvulla³⁰³. Kansallisarkiston balusterikaiteen betoninäytteistä ei löydetty muita seos- tai lisäaineita.

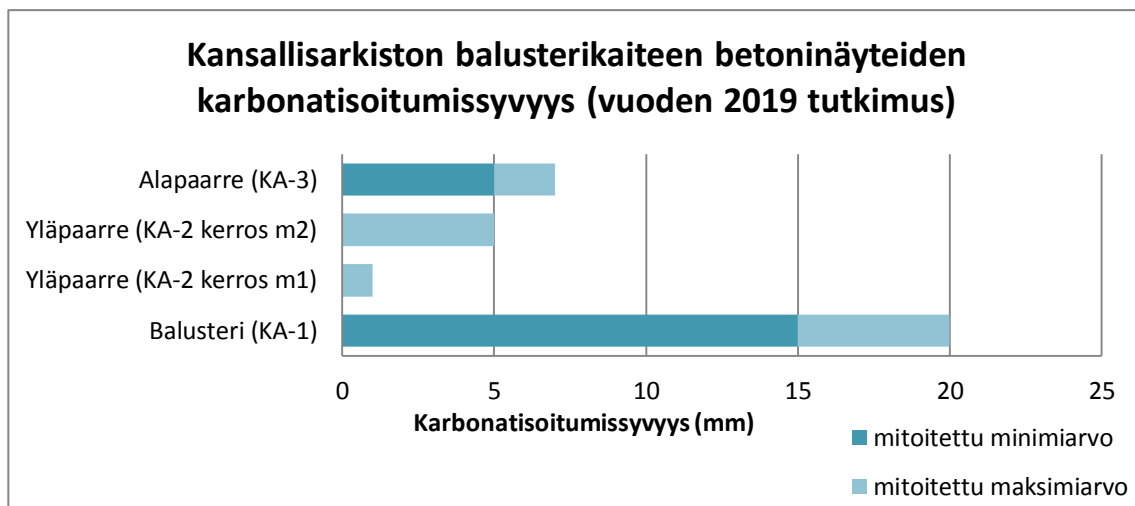


Kuva 54. Ohuthieanalyysin mikroskooppikuva kansallisarkiston balusterikaiteen yläpaarteen (KA-2 kerros m1) näytteestä. Kuvan keskellä olevat mustat pallot ovat lentotuhka. Sideaine on kuvassa tummaruskean värinen ja kiviaines on vaalean värinen (Eurofins Expert Services 2019).

Alaparteen (KA-3) näytteen sementtimäärä on suuri. Tämän näytteen seossuhde vastaa ulkoilman rasituksille alttiin betonirakenteiden seossuhteen suositusta, joka esitettiin 1900-luvun alkupuolen betonioppaissa. Yläpaarteen (KA-2 kerrokset m1 ja m2) näytteen sementtimäärät ovat myös suuret. Balusterin (KA-1) näytteen sementtimäärä on pienempi kuin muissa näytteissä. Lisäksi näytteen seossuhde ei vastaa ulkoilman rasituksille alttiin betonirakenteiden 1900-luvun alkupuolen seossuhteen suositusta.

Kansallisarkiston balusterikaiteen betoninäytteiden karbonatisoitumisvyyden määrittämisen tulokset ovat esitettynä kuvassa 55. Karbonatisoitumisvyyden vaihtelu eri näytteissä on suuri. Yläpaarteen (KA-2) näytteen molempien kerrosten karbonatisoitumisvyys on pieni. Kerros m1 ei ole juurikaan karbonatisoitunut, kerroksessa m2 karbonatisoituneen vyöhykkeen paksuus vaihtelee välillä 0-5 mm. Alaparteen (KA-3) näytteen karbonatisoitumisvyys vaihtelee välillä 5-7 mm. Balusterin (KA-1) näytteen betoni on karbonatisoitunut enemmän kuin muiden balusterikaiteen osien betoni.

³⁰³ Koskinen 2019b, haastattelu

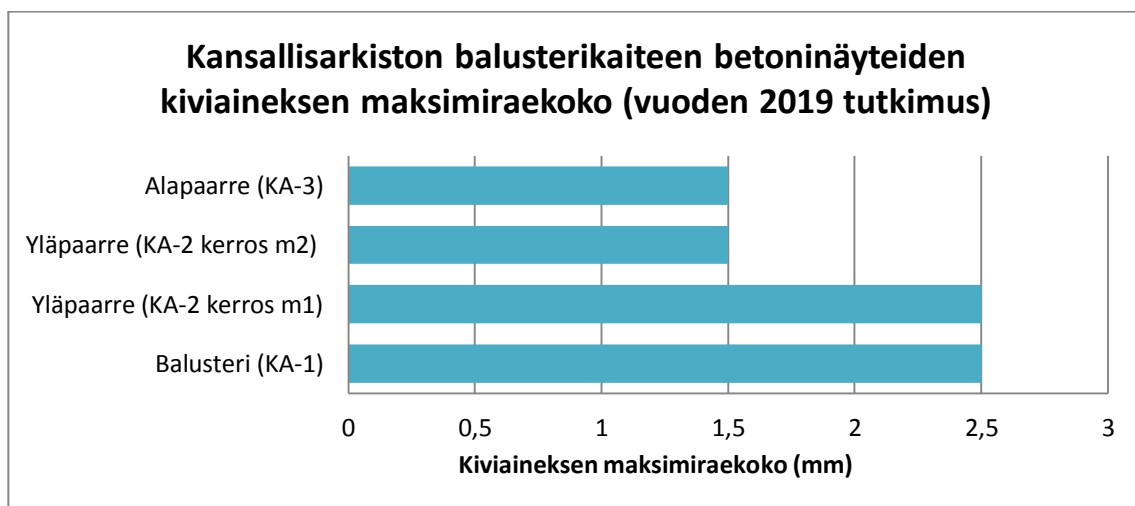


Kuva 55. Vuoden 2019 tutkimuksessa mitoitettut Kansallisarkiston balusterikaiteen betoninäytteiden karbonatisoitumissyvydet. (Eurofins Expert Services 2019 pohjalta).

Taulukko 11. Vuoden 2019 tutkimuksessa mitoitettut Kansallisarkiston balusterikaiteen näytteiden kalsiumhydroksidi- ja kalsiumkarbonaattipitoisuudet (Eurofins Expert Services 2019 pohjalta).

Näytteen tunnus	Tarkennus	Ca(OH) ₂ p-%	CaCO ₃ p-%
KA-1	balusteri	0,9	16,8
KA-2 kerros m1	yläpaarre	1,2	7,3
KA-2 kerros m2	yläpaarre	0,6	9,6
KA-3 pohjakerros	alapaarre	2,9	4,5

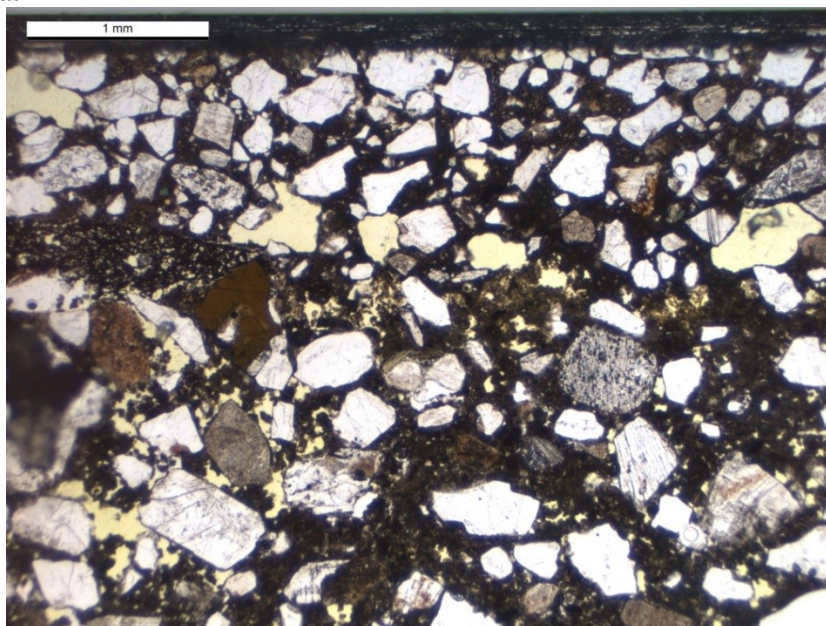
Kansallisarkiston balusterikaiteen näytteiden kalsiumhydroksidi- ja kalsiumkarbonaattipitoisuudet ovat esitettynä taulukossa 11. Pitoisuudet kertovat karbonatisoitumisprosessin etenemisestä betoninäytteissä. Tulosten mukaan missään näytteessä karbonatisoitumisprosessi ei edennyt loppuun asti, koska näytteiden kalsiumhydroksidipitoisuudet ovat nolasta suurempia. Suurin kalsiumhydroksidipitoisuus, joka on 2,9 p-%, on alapaarteiden (KA-3) näytteessä. Balusterin (KA-1) ja yläpaarteiden (KA-2 kerros m2) näytteissä kalsiumhydroksidipitoisuus on alle 1 p-%. Lisäksi balusterin (KA-1) näytteen kalsiumkarbonaattipitoisuus on noin 2-4 kertaa suurempi kuin muiden näytteiden kalsiumkarbonaattipitoisuudet. Tämä johtuu todennäköisesti lisätyn kalkin karbonatisoitumisesta.



Kuva 56. Vuoden 2019 tutkimuksessa mitoitettu Kansallisarkiston balusterikaiteen betoninäytteiden maksimiraekoko. (Eurofins Expert Services 2019 pohjalta).

Kansallisarkiston balusterikaiteen näytteiden kiviaines koostuu alle 2,5 mm rakeisesta kiviaineksesta. Kiviainesrakeiden muoto on pääosin pyöristynyt. Kiviaines koostuu pääosin graniittisista kivilajeista: kvartsi- ja maasälpämineraaleista. Näiden lisäksi balusterin (KA-1) näytteessä havaittiin vähän amfiboli- ja kiillemineraaleja. Yläpaartein (KA-2 kerros m1) näytteen kiviaines erottuu koostumukselta muiden näytteiden kiviaineksesta. Tämän näytteen kiviaines koostuu graniitin lisäksi kiilleliuskeesta ja gneissistä.

Balusterin (KA-1) ja yläpaartein (KA-2) näytteiden huokosrakenteessa on paljon muodoltaan epämääräisiä pieniä huokosia, jotka jakautuvat näytteissä epätasaisesti (kuva 57). Alapaartein (KA-3) näyte on huokosrakenteelta melko tiivis. Muodoltaan epämääräisiä huokosia esiintyy betoninäytteessä kuitenkin kohtalaisen paljon. Huokosrakenteen perustella suihkulähteen tutkitut betonit todennäköisesti eivät olisi nykyvaatimusten perustella pakasenkestäviä.



Kuva 57. Ohutleikkauksen mikroskooppikuva Kansallisarkiston balusterikaiteen balusterin (KA-1) näytteen rakenteesta. Pohjakerroksen rakenne on paikoittain todella huokoinen. Sideaine on kuvassa tumman värinen, kiviaines on vaalean värinen ja huokokset ovat keltaisia (Eurofins Expert Services 2019).

Olettavasti pakkasrapautumisen seurauksena muodostuneita pitkiä säröjä havaittiin yläpaartein (KA-2 kerros m2) näytteen rakenteesta. Tämän näytteen rakenne vaikutti pahoin rapautuneelta. Yläpaartein (KA-2 kerros m1) ja alapaartein (KA-3) näytteissä ei havaittu merkittäviä halkeiluvaurioita. Balusterin (KA-1) näytteen rakenteesta havaittiin muutamia mikrosäröjä, jotka ovat muodostuneet todennäköisesti kuivumiskutistumisen seurauksena.

Kaikissa näytteissä esiintyy pieniä määriä hemihydraattia. Tämän lisäksi ettringiittiä esiintyy yläpaartein (KA-2 kerros m1) näytteessä. Toisessa yläpaartein (KA-2 kerros m2) näytteestä ei kuitenkaan havaittu ollenkaan sulfaattimineraaleja.

6.4.4 Vertailu aikaisempiin tutkimuksiin

Tässä luvussa vertaillaan tutkimuskeskuksen Eurofins Expert Services saamia Kansallisarkiston balusterikaiteen betoninäytteiden tutkimustuloksia aikaisempiin tutkimustuloksiin. Kansallisarkiston balusterikaiteen kuntotutkimuksen suoritti vuonna 2010 tutkimuskeskus Contesta Oy. Kuntotutkimus sisälsi suihkulähteen silmämääräisiä kuntoselvityksiä, kenttätutkimuksia sekä 6 poranäytteen laboratoriotutkimuksia. Kenttätutkimuksilla määriteltiin betoniterästen peitepaksuusjakamaa. Laboratoriotutkimuksilla määritettiin karbonatsoi-

tumissyvyyttä ja kolmen betoninäytteen vetolujuutta. Lisäksi kolmen näytteen mikrorakennetta tutkittiin ohuthieanalyysillä.

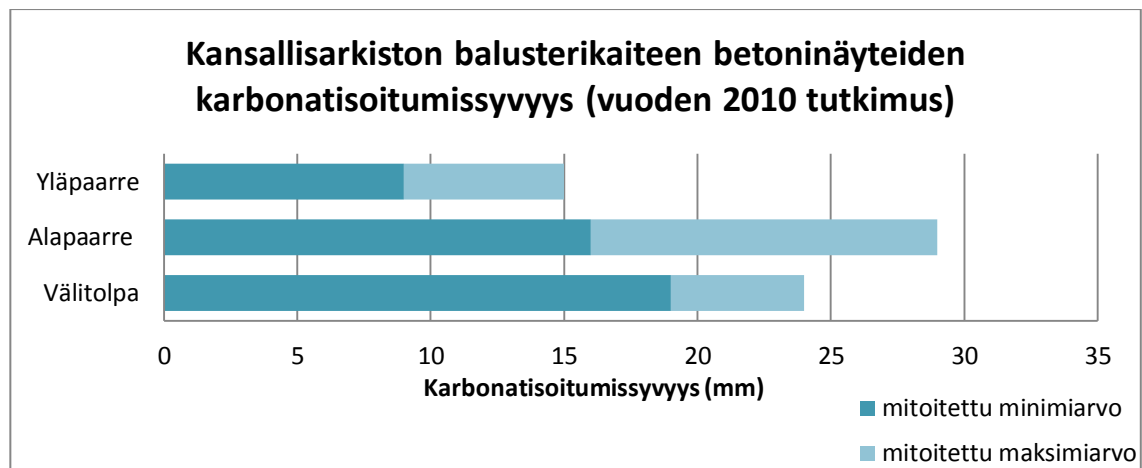
Vuoden 2010 tutkimusaineistosta vertailussa käytetään ainoastaan ohuthieanalyysin tutkimustuloksia. Ohuthieanalyysia varten betoninäytteitä otettiin balusterikaiteen loppupään rakenneosista: välitolpasta, alapaarteesta ja yläpaarteesta.

Taulukko 12. Kansallisarkiston balusterikaiteen sideainetyypin tutkimustulokset vuodelta 2010 (Contesta Oy. 2010 pohjalta)

Näytteen otto- paikka	Sideainetyyppi + seos- ja lisäaineet	Reagoimattomat sideainepartikkelit
välitolppa	portlandsementti + masuunikuona	ei ole tietoja
alapaarre	portlandsementti + masuunikuona	ei ole tietoja
yläpaarre	portlandsementti + masuunikuona	ei ole tietoja

Vuoden 2010 sideainetutkimustulokset eroavat paljon vuoden 2019 tuloksista. Vuoden 2010 tutkimustulosten perustella kaikkien betoninäytteiden sideaine on samantyyppinen. Kaikkien betoninäytteiden sementti arviointiin portlandsementiksi, jonka hydrataatioaste on korkea. Tämän lisäksi betoninäytteissä havaittiin seosaineena käytetty masuunikuonaa, josta ei ole yhtään havaintoja vuoden 2019 tutkimustuloksissa.

Kuonaa käytettiin betonin valmistuksessa ainakin 1800-luvun loppupuolelta alkaen. Vuoden 2010 tutkimustuloksista käy ilmi, että masuunikuona on todennäköisesti modernin masuunikuonan kaltainen. Vuoden 2010 betoninäytteissä ei havaittu lisättyä kalkkia eikä muiden lisäaineiden merkkejä. Tämä myös erottaa vuoden 2010 ja vuoden 2019 tutkimustuloksia toisistaan.

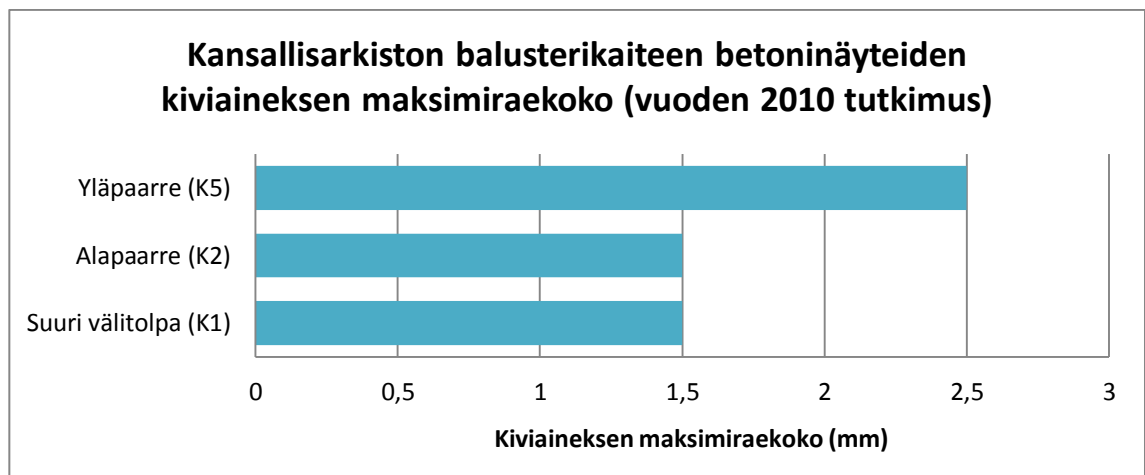


Kuva 58. Vuoden 2010 tutkimuksessa mitoitettut Kansallisarkiston balusterikaiteen betoninäytteiden karbonatisoitumissyvydet (Contesta Oy. 2010 pohjalta).

Vuoden 2010 betoninäytteiden karbonatisoitumissyvydet ovat keskimäärin 10–20 mm, kuten myös vuoden 2019 karbonatisoitumissyvyden arvojen välissä on suuri hajonta. Tämän lisäksi vuoden 2010 betoninäytteet ovat huokosuusrakenteelta erilaisia kuin vuoden 2019 betoninäytteet. Vuoden 2010 betoninäytteissä esiintyy melko runsaasti epäsäännöllisen muotoisia enintään #1,5 mm kokoisia huokosia. Contesta Oy:n asiantuntijan mukaan

näytteiden betoni saattaa olla paikoin pakkasenkestävää. Näin ollen vuoden 2019 näytteiden betonit eivät ole todennäköisesti pakkasenkestäviä huokosrakenteensa perustella.

Molempien tutkimustulosten mukaan kiviaineksen maksimiraekoko on välillä 1,5–2,5 mm. Tähän vaikuttaa balusterikaiteen rakenneosien suhteellisen pieni koko ja monimutkainen muoto. Tämän lisäksi vuoden 2010 betoninäytteiden kiviaines koostuu pääosin graniittisista kivirakeista kuten myös vuoden 2019 näytteiden kiviaines. Kiviaineksen rakeiden muoto eroaa kuitenkin kahden tutkimusraportin perustella. Vuoden 2010 betoninäytteissä kiviaineksen rakeet ovat muodoltaan pääosin kulmikkaita, vuoden 2019 betoninäytteiden kiviaines vastaavasti on pääosin pyörästynyt. Tämä voi johtua myös eri tahojen erilaisesta tavasta arvioida kiviaineksen laatua.



Kuva 59. Vuoden 2010 tutkimuksessa mitoitettu Kansallisarkiston balusterikaiteen betoninäytteiden maksimiraekoko (Contesta Oy. 2010 pohjalta).

Vuoden 2010 betoninäytteistä ei löydetty pakkasrapautuman merkkejä poiketen vuoden 2019 betoninäytteistä. Lisäksi tutkimustulosten perusteella vuoden 2010 betoninäytteissä esiintyy runsaimmin sulfaattivaurioiden merkkejä kuten etringiittiä.

6.4.5 Tutkimustulosten yhteenveto

Tutkimuskeskuksen Eurofins Expert Services³⁰⁴ tutkijoiden mukaan vuoden 2019 näytteiden betonit eivät edusta alkuperäistä ja historiallista betonia suuren kalsiumhydroksidipitoisuuden ja pienin karbonatisoitumissyvyyden perustella. Luvun 4.6 kirjallisuuskatsauksen tiedot osoittavat kuitenkin, että karbonatisoitumisprosessin etenemisen perustella ei voida luotettavasti määritellä betonin ikää. Esimerkiksi sideainetyypin ja lisäaineen tyypin perustella betonin ikää voidaan arvioida luotettavammin.

Vuoden 2010 ja vuoden 2019 tutkimustulokset eroavat erittäin paljon toisistaan erityisesti side- ja seosaineiden osuudessa. Vuoden 2010 tutkimuksissa havaittu masuunikuonaa viittaa siihen, että balusterikaiteen keskiosan ja loppupäätyyn betoniosat voisivat olla pääosin uudempia kuin 1800-luvun loppupuolelta.

Vuoden 2019 tutkimuksessa betoninäytteiden koostumukset eroavat toisistaan. Yläpaarteen näytteen lentotuhkaa sisältävä betonikerros (KA-2 kerros m1) suurella todennäköisyydellä edustaa modernia korjausbetonia, koska näyte sisältää modernia seosainetta. Tutkimustulosten perustella yläpaarteen (KA-2 kerros m2) toinen kerros saattaa myös edustaa korjausbetonia.

³⁰⁴ Eurofins Expert Services 2019

Tutkimuskeskuksen Eurofins Expert Services tutkijoiden betoninäytteiden ikäarviosta huolimatta, diplomityössä esitetyn laboratoriotutkimustulosten analyysin perustella balusteri (KA-1) ja alakaide (KA-3) saattavat olla alkuperäisiä rakenneosia tai ensimmäisten balusterikaiteen korjausten lisäyksiä. Näiden näytteiden mikrorakenteissa on historiallisten betonien piirteitä. Tutkimustulosten nojalla on kuitenkin haastava tehdä varmoja johtopäätöksiä betonien iästä.

6.5 Kokeellisen osion tavoitteiden saavuttaminen

Kokeellisen tutkimuksen alussa asetetuista tavoitteista, jotka on esitetty luvussa 6.2, saavutettiin kuudesta tavoitteista viisi. Diplomityön kokeellisessa tutkimuksessa selvitettiin näytteiden betonien seossuhteet, lisäaineiden tyypit, huokosrakenteet, kuntoa ja kiviainesten maksiminraekoot ja laatu. Yksi tärkeimmistä kysymyksistä jäi kuitenkin selvittämättä. Tutkimustulosten perustella sideainetyyppiä ei pystytä luokittelemaan luvun 3.1 mukaisesti, mikä vaikeuttaa sopivan korjausbetonin valintaa.

Kokeellisen tutkimuksen aikana tuli esille monia historiallisten betonien tutkimuksiin liittyviä puutteita ja haasteita, jotka voivat johtaa tutkimustulosten vääristymiseen ja virhelisien korjausbetonien valintaan.

1. Silmämääräisen kuntoselvityksen perustella ei voida määrittää näytteenottopaikkoja niin, että betoninäytteet edustaisivat suurella varmuudella alkuperäistä betonia. Korjauskerrosten havaitseminen silmämääräisesti ennen näytteenottoa on erittäin haastavaa monissa tapauksissa. Edellisten korjausten asiakirjat helpottaisivat huomattavasti kuntotutkimusohjelman laatimisessa. Usein edellisten korjausten asiakirjat eivät ole käytettävissä erillisistä syistä, joista yleisin niiden puute.
2. Historiallisten betonien tutkimuksissa sideainetyypin määrittämiseen ei kiinnitetä riittävästi huomiota. Sideainetyypin arviot perustuvat pääosin asiantuntijoiden silmämääräisiin havaintoihin ohuthieanalyysissä. Sideainetyyppi voidaan määrittää luotettavammin soveltaen uusia tutkimustuloksia historiallisten betonien mikrorakenteesta, kuten esimerkiksi kalsiumsilikaattien pitoisuuksien muutosta. Sekä tutkimuslaboratorioiden resurssien puute että kokemusten puute uuden teknologian käytöstä estävät kuitenkin uusien tietojen soveltamista historiallisten betonien tutkimuksissa Suomessa.
3. Historiallisten betonien tutkimuksissa betonin iän arvioinnissa ei ole käytössä luotettavia keinoja. Luvussa 4.6 esitettyjen tietojen nojalla karbonatisoitumisprosessin etenemisen perustella ei voida luotettavasti määritellä betonin ikää. Esimerkiksi sideainetyypin ja lisäaineen tyypin perustella betonin ikää voidaan arvioida luotettavammin.

Luvun 6.1 tutkimusmenetelmien kartoituksen aineistoon tutkimustuloksista kävi ilmi muitakin historiallisten betonien tutkimusten puutetta ja haasteita:

1. Kartoituksen aineiston tutkimustulosten tarkastelun perustella historiallisia betoninäytteitä tutkitaan yleensä samalla tavalla kuin moderneja betoninäytteitä. Tästä syystä ei kiinnitetä riittävästi huomioita historiallisten betonien sideainetyyppiin ja ikään arviointiin, joilla on suuri merkitys sopivan korjausmenetelmän ja materiaalin valintaan.

2. Lisäksi kuntotutkimussuunnitelma laaditaan yleensä taloudellisista syistä ennen laajaan silmämääräisen kuntoselvityksen suorittamista ja näytteenottoa suoritetaan silmämääräisen kuntoselvityksen yhteydessä. Kokeellisen osuuden tutkimustulokset osoittavat, että kuntotutkimusohjelmaan laatiminen onnistuu parhain yksityiskohtaisen kuntoselvitysraportin nojalla.

7 Soveltava osio

7.1 *Suositus historiallisten betonirakenteiden tutkimusmenetelmien valintaan*

Tässä luvussa esitetään ennen vuotta 1930 valmistettujen betonirakenteiden kuntotutkimuksen etenemisen suositusta, jossa huomioitiin luvussa 6.5 esitettyjä kokeellisen tutkimuksen puuteita ja ongelmia. Suositus on esitetty toimintakaavion muodossa liitteessä 4. Suosituksen tarkoitus on tehostaa historiallisten betonirakenteiden tutkimuksia ja parantaa tutkimustulosten laatua. Tämän lisäksi suosituksella pyritään vähentämään betoninäytteiden määrää kansainvälisen standardin SFS-EN 16085 mukaan.

Ensimmäisenä haetaan kaikki olemassa olevia taustatietoja korjauskohteesta. Taustatietoja haetaan mm. alkuperäisistä rakennusasiakirjoista ja aikaisemmista korjausasiakirjoista. Laaja lista tarpeellisista lähtötietomateriaaleista on esitetty standardissa SFS-EN 16096. Kattavan taustatietopaketin hankkiminen on tärkeää korjauskohteen kunnon arvioinnissa ja näytteenottoa paikkojen määrittämisessä.

Seuraavaksi tehdään silmämääräisiä kuntoarviota ja kuntoselvitystä. Silmämääräinen kuntoselvitys on suositeltavaa suorittaa standardia SFS-EN 16096 soveltaen. Silmämääräisestä kuntoselvityksestä laaditaan yksityiskohtainen kuntoselvitysraportti.

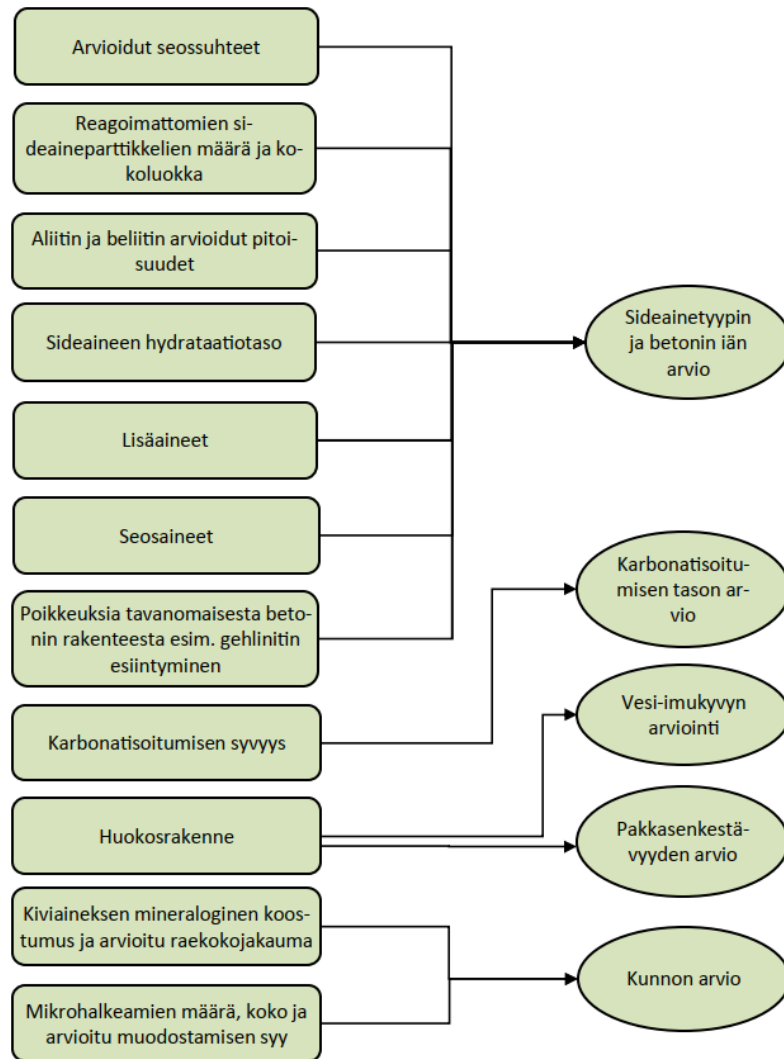
Kuntoselvityksen pohjalta laaditaan kuntotukitusohjelma, johon ohjaavat standardit SFS-EN 16096 ja SFS-EN 16085. Kuntotutkimusohjelman pitää sisältää kenttä ja/tai laboratoriotutkimusmenetelmien ja näytteenottoa paikkojen ehdotuksia. Ehdotuksia perustellaan aikaisemmin kerätyn aineiston pohjalta. Kuntotutkimusohjelmaa hyväksytään tilaajalta.

Kenttätutkimuksia päätetään erikseen jokaisen korjauskohteen tarpeiden ja kunnon mukaan. Esimerkiksi kantavien rakenteiden kohdalla on yleensä tärkeä mitata puristuslujuutta, jota voisi arvioida koko rakenteen kuormien kantokyky. Kanttaavien rakenteiden puristuslujuuden mittaamiseen soveltuu parhaiten iskuimpulssimenetelmä. Tapauksissa joissa kimmovasaran mahdollisesti aiheuttamat pintavauriot olisi haitaksi korjauskohteen arvolle, on suositeltavaa miettiä ultraäänimenetelmän soveltamista betonirakennneosien puristuslujuuden arviointiin.

Näytteenotto tehdään hyväksytyn tutkimussuunnitelman mukaan SFS-EN 16085 standardia soveltaen. Näytteenottoa dokumentoidaan tarkasti esimerkiksi valokuvilla.

Historiallisten betonirakenteiden kohdalla on suositeltava suorittaa ohuthieanalyysiä, koska tällä hetkellä ohuthieanalyysi on tehokkain tutkimusmenetelmä betonien mikrorakenteen tutkimiseen. Muita laboratoriotutkimuksia päätetään ohuthieanalyysin tulosten perustella korjauskohteen tarpeiden ja kunnon mukaan. Siinä tapauksessa kun tarvittava tieto varmasti ei saa ohuthieanalyysistä eikä ohuthieanalyysin tuloksen vaikuttavat laboratoriotutkimuksen suorittamiseen, laboratoriotutkimusta tilataan yhtään aikaa ohuthieanalyysin kanssa.

Historiallisten betonien ohuthieanalyysissä on suositeltava kiinnittää huomiota historiallisten betonien sideainetyyppiin ja iän arviointiin. Ohuthieanalyysin päätöksiä on suositeltava perustella ohuthieanalyysin havainnoilla ja/tai mikroskooppikuvilla.



Kuva 60. Ohuthieanalyysin johtopäätöksiä voidaan perustella tietyillä havainnoilla esimerkiksi kaavion mukaisesti.

Historiallisten betonirakenteiden kohdalla ylimääräisten laboratoriotutkimusten tarvetta, jotka kasvavat porausnäytteiden määrää, on suositeltava miettiä tarkkaan. Mahdollisuuden mukaan laboratoriotutkimuksia voidaan korvata kenttätutkimuksilla tai tarvittavan ominaisuuksien selvittämiseksi voidaan soveltaa ohuthieanalyysin tuloksia. Esimerkiksi vetolujuuden suurusluokka on mahdollista arvioida ohuthieanalyysillä huokosrakenteen ja kunnon perustella tai ainetta rikkomattoman ultraäänimenetelmän perustella. Vetolujuuden määrittämisen suorien laboratoriomienetelmien betoninäytteiden tarve on suuri, tästä syystä näiden menetelmien käyttö ei ole suositeltava historiallisten betonirakenteiden kohdalla.

Jos ensimmäisten tutkimustuloksissa on paljon ristiriitaisia tietoja ja niiden perustella ei voitu tehdä korjaussuunnitelman laatimiseen tarvittavia johtopäätöksiä, laaditaan uutta kuntotutkimusohjelmaa. Uudessa kuntotutkimusohjelmassa huomioidaan ensimmäisiä tutkimustuloksia.

Jos ensimmäisistä tutkimustuloksista puuttuu joku olennainen tieto ja ei voida tehdä korjaussuunnitelman laatimiseen tarvittavia johtopäätöksiä, tehdään jatkotutkimuksia. Jatkotutkimusten edellytykset voivat olla esimerkiksi seuraavia:

- sideainetyyppi ja betonin ikä ei pystytty arvioimaan luotettavasti ohuthieanalyysillä,
- betoninäytteen mikrorakenteessa on jotain huomiota herättävää, jota ei pystytty selvittämään ohuthieanalyysillä,
- tarvitaan tarkempia tietoja jostain betonin ominaisuuksista kuten lujuus, seossuhde jne.

Jatkotutkimuksia päätetään erikseen ensimmäisten tutkimustulosten nojalla ja jatkotutkimusohjelmaa hyväksytään tilaajalla. Esimerkiksi pyyhkäisyelektronimikroskooppianalyysiä voidaan käyttää betonin sideainetyypin tarkempaan määrittämiseen tai kemiallisia menetelmiä seossuhteiden tarkempaan määrittämiseen.

Jatkotutkimuksissa on suositeltava mahdollisuuksien mukaan hyödyntää aikaisemmista laboratoriotutkimuksista jääneitä betonikappaleita. Silloin kun tutkimusmenetelmän näyte-tarve on suurempi kuin ohuthieen valmistuksesta jääneet näyteosat, suoritetaan uusi näytteenotto. Ehdotus näytteenottopaikoiksi esitetään jatkotutkimusohjelmassa.

7.2 Suositus historiallisten betonirakenteiden korjaussuunnitelman valintaan

7.2.1 Yleinen suositus korjaussuunnitelman valintaan

Tässä luvussa esitetään ennen vuotta 1930 valmistettujen betonirakenteiden korjaussuunnitelman valinnan suositus, jossa on huomioitu diplomityön tulokset ja johtopäätökset. Suositus on esitetty toimintakaavion muodossa liitteessä 5. Suosituksen tarkoitus on helpottaa korjausmenetelmien ja korjausbetonin valinnan hallintaa koskien historiallisten betonirakenteiden korjaamista.

Korjaussuunnitelma tehdään kuntoselvityksen tulosten perusteella. Historiallisten betonirakenteiden korjaussuunnitelman laatimisessa sovelletaan standardien SFS-EN 16853 ja SFS EN 1504 ohjeita. Korjaussuunnitelman sisältää korjausperiaatteiden ehdotuksen sekä korjausperiaatteen mukaisten korjausmenetelmien ja korjausmateriaalien ehdotuksia. Korjaussuunnitelma hyväksytään tilaajalla. Tämän lisäksi historiallisten rakenteiden kohdalla yleensä pyydetään korjaussuunnitelmasta Museoviraston lausunto.

Ennen korjaussuunnitelman laatimista selvitetään kuntoselvityksen tulosten perustella vastauksia seuraaviin kysymyksiin:

1. Onko rakenneosien betoni historiallinen? Tässä diplomityössä historiallinen betoni on ennen vuotta 1930 valmistettu betoni. Monet kirjallisuuslähteet määrittelevät myös ennen vuotta 1970 valmistettuja betoneja historialliseksi³⁰⁵. Tässä diplomityössä ei ole otettu kantaa vuosien 1930–1970 aikavälin betoneihin. Korjauskohhteessa historiallinen betoni voi olla käytetty alkuperäisten betoniosien valmistuksessa tai ennen vuotta 1930 korjausbetoniosien valmistuksessa.
2. Ovatko korjauskohteen betonirakenteet huonossa kunnossa? Betonirakenteen kuntoa arvioidaan kuntoselvityksen perusteella. Betonirakenteen tai sen rakenneosien

³⁰⁵ esim. English heritage 2012

kuntoa voidaan määrittää huonoksi, a) jos vauriot voivat johtaa betonirakenteen tai sen rakenneosien tuhoutumiseen; b) jos vauriot estävät betonirakenteen tai sen rakenneosien tarkoituksenmukaista käyttöä; c) tai jos betonirakenteen kunto aiheuttaa terveysriskiä ihmisille.

3. Onko betoniosien korjaus mahdollista ja taloudellisesti kannattavaa? Joskus erittäin rapautuneiden betonirakenteiden tai sen osien korjaaminen voi olla mahdotonta tai korjauksella ei pystytä saavuttamaan kestävästä korjaustulosta. Lisäksi joskus vaativan korjauksen ja sen tuloksen ylläpitämisen kustannus voi olla todella korkea, mikä on huomioitava korjaussuunnitelman laatimisessa.

Edettäessä toimintakaavion ohjeiden mukaan valitaan yksi viidestä, alla esitetystä korjaussuunnitelman vaihtoehtoista. Yhden korjausprojektin sisällä voidaan käyttää erilaisia korjaussuunnitelman vaihtoehtoja, jos eri rakenneosat eroavat toisista ominaisien tai kunnon perustella.

Korjaussuunnitelma I

Tapauksissa, joissa betonirakenneosien vauriot eivät edenneet pitkään, voidaan siirtää korjausta ajassa eteenpäin. Tässä tapauksessa betonirakenneosien vaurioiden etenemistä on seurattava ja on korjattava myöhemmin tarpeen mukaan. Korjaussuunnitelmassa I ei ole tarvetta korjausbetonin valintaan.

Korjaussuunnitelma II

Tapauksissa, joissa rakenneosien betoni ei ole historiallinen, korjausta voidaan tehdä nykypäivän korjausmenetelmillä. Nykypäivän korjausmenetelmillä pyritään parantamaan betonirakenteen tai sen osien kuntoa ja kuormien kantokykyä. Korjaussuunnitelmassa II valitaan sopiva korjausbetonia modernien korjausbetonien valikoimasta.

Korjaussuunnitelma III

Tapauksissa, joissa huonokuntoisten betonirakenneosien korjaaminen on mahdoton tai taloudellisesti epäkannattavaa, voidaan uusia rakennetta tai sen osia. Purun jälkeen rakennetta tai sen osia voidaan uudelleen rakentaa nykypäivän rakennusmenetelmiä tai alkuperäisiä mukailevia rakennusmenetelmiä käyttäen. Korjaussuunnitelmassa II uudelleen rakentamisessa voidaan käyttää modernia betonia tai alkuperäistä historiallista betonia mukaileva betonia.

Korjaussuunnitelma IV

Tapauksissa, joissa historiallisten huonokuntoisten betonirakenneosien korjaaminen on mahdotonta tai taloudellisesti epäkannattavaa, voidaan koko betonirakennetta tai sen erillisiä osia säilyttää konservointimenetelmillä. Konservointimenetelmien tarkoitus on säilyttää betonirakennetta tai sen osia pysäyttämällä rapautumista. Konservointimenetelmät ovat mm. puhdistus, vahvistus ja irronneiden palojen paikoille kiinnitys. Korjaussuunnitelmassa IV ei ole tarvetta korjausbetonin valintaan.

Korjaussuunnitelma V

Tapauksissa, joissa historiallisten betonirakenneosien korjaaminen on mahdollista ja taloudellisesti kannattavaa, korjausta on tehtävä pääosin restaurointi- tai entisöintimenetelmillä. Restaurointimenetelmillä pyritään saamaan korjauskohde alkuperäistä muistuttavaan kuntoon. Restauroinnissa säilytetään yleensä kaikki alkuperäiset osat sekä aikaisempien korjausten kerrostumia. Entisöintimenetelmillä pyritään palauttamaan korjauskohde tiettyyn historiallisen vaiheeseen. Entisöinnissä yleensä poistetaan myöhempien korjausten lisäyk-

siä. Sekä restauroinnissa että entisöinnissä pyritään käyttämään alkuperäisiä materiaaleja ja tapoja.

Korjaussuunnitelmassa IV valitaan mahdollisimman paljon alkuperäistä historiallista betonia ominaisuuksilta ja koostumukselta vastaavaa korjausbetonia. Tiettyjä ominaisuuksia kuten pakkasenkestävyyttä, tartunta vanhaan betonikerrokseen tai kutistumista on mahdollistaa parantaa, jotta korjaustulos olisi kestävämpi. Korjausbetonin kehittämiseksi on tehtävä koevaluja, joiden avulla voidaan kokeilla korjausbetonivaihtoehtojen yhteensopivuutta korjauskohteen betonin kanssa.

Erityistä huomiota korjausbetonin kehittämisessä on kiinnitettävä korjausbetonin sideaineen valintaan. Tällä hetkellä markkinoilta löytyy muuttamia sideainevaihtoehtoja, jotka vastaavat ominaisuuksilta historiallisia sementtejä:

- Ranskalaisen yritys Freedom Cement valmistaa luonnonsementtejä Century Brand Natural Cement ja Vicat Prompt Natural Cement restaurointitarpeisiin. Nämä luonnonsementit vastaavat osittain ominaisuuksilta historiallista luonnonsementtiä ja varhaista keinotekoista sementtiä. Yritys valmistaa luonnonsementtejä yli 100 vuotta vanhan teknologiaa käyttäen.³⁰⁶
- Yhdysvaltalaisen yrityksen Edison Coatings valmistama luonnonsementti, Rosendale & Translantic 10C Natural Cement, vastaa osittain ominaisuuksilta historiallista luonnonsementtiä ja varhaista keinotekoista sementtiä. Yritys Edison Coatings valmistaa luonnonsementtiä standardin ASCT 10 mukaan erityisesti restaurointitarpeisiin.³⁰⁷
- NHL5 vahva hydraulinen kalkki vastaa osittain ominaisuuksilta historiallista luonnonsementtiä ja varhaista keinotekoista sementtiä. Tätä hydraulista kalkkia käytetään yleensä historiallisten rakenteiden korjausmuurauslastien valmistuksessa. NHL5 vahva hydraulinen kalkki voi sopeutua myös historiallisten rakenteiden korjausbetonien valmistukseen.³⁰⁸
- Portlandsementit CEMI ja CEMII vastaavat osittain ominaisuuksilta historiallista portlandsementtiä. Näitä portlandsementtejä käytetään laajasti mm. Englannissa 1900-luvun alkupuolen historiallisten rakenteiden korjaamisessa.³⁰⁹

7.2.2 Case-kohteiden korjaussuunnitelmien ehdotus

Tässä luvussa tehdään case-kohteiden korjaussuunnitelmien ehdotuksia luvun 7.2.1 ennen vuotta 1930 valmistettujen betonirakenteiden korjaussuunnitelman valinnan suosituksen mukaan. Korjaussuunnitelmien ehdotusten laatimisessa käytetään case-kohteiden kuntoselvitysten tuloksia, jotka analysoitiin luvuissa 6.3 ja 6.4.

Case-kohde I: Säätöalan suihkulähde

Ensin käydään läpi luvun 7.2.1 suosituksen kysymyksiä:

1. Luvun 6.3 tutkimustulosten perustella suurella todennäköisyydellä suurin osa Säätöalan suihkulähteen betoniosista on alkuperäistä rakennetta ja on valmistettu historiallisista betoneista.

³⁰⁶ Freedom Cement

³⁰⁷ Edison Coating Jnc

³⁰⁸ Lehtonen 2016

³⁰⁹ English heritage 2012

2. Kuntoselvityksen perustella suihkulähde on korjauksen tarpeessa. Lukuisista vaurioista johtuen kammion rakenteiden ja altaiden kunto estää suihkulähteen tarkoituksenmukaisen käytön. Lisäksi julkisivun koriste-elementtien vauriot voivat johtaa koriste-elementtien osittaiseen tuhoutumiseen.
3. Kuntoselvityksen perustella suihkulähteen korjaaminen on mahdollinen ja taloudellisesti kannattava.

Ennen vuotta 1930 valmistettujen betonirakenteiden korjaussuunnitelman valinnan suosituksen perustella Säätytalon suihkulähteen tapauksessa on suositeltava edetä korjaussuunnitelman V mukaan. Korjaussuunnitelman V mukaan suihkulähteen korjausta suositellaan tehtäväksi pääosin restaurointi- tai entisöintimenetelmillä. Suihkulähteen yksittäisten julkisivun koriste-elementtien vauriot ovat edenneet hyvin pitkälle. Pahasti vaurioituneiden koriste-elementtien korjaamisella ei todennäköisesti saavuteta kestävää korjaustulosta. Tästä syystä näiden koriste-elementtien korjaaminen voi olla taloudellisesti epäkannattavaa ja voi olla järkevämpi purkaa ja valmistaa koristeet uudelleen alkuperäisiä rakennusmenetelmiä mukaillen (korjaussuunnitelma III).

On suositeltavaa kehittää korjausbetoni korjauskohdekohtaisesti niin, että korjausbetoni vastaisi ominaisuuksiltaan mahdollisimman hyvin paljon suihkulähteen alkuperäisiä historiallisia betoneita. Parhaan vastaavuuden löytämiseksi on suositeltavaa iteroida sopivaa seosta usealla eri betoniresepteillä ja eri sideaineilla. Todennäköisesti korjauskohteeseen on valmistettava kaksi erilaista betoniseosta maanpäällisten ja maanalaisten osien korjaukseen, koska tutkimustulosten perustella betonit ovat ominaisuuksiltaan erilaisia. Korjausbetonin ulkonäköominaisuuksien lisäksi tulee korjausbetonin valmistuksessa kiinnittää muun muassa huomiota betonin kutistumisominaisuuksiin, pakkasenkestävyyteen, huokoisuuteen. Lisäksi olisi suotavaa, että korjausbetoni ikääntyisi samalla tavalla kuin alkuperäinen betoni, jotta korjatut kohdat eivät erottuisi liikaa rakenteen vanhetessa.

Case-kohde II: Kansallisarkiston balusterikaide

Ensin käydään läpi luvun 7.2.1 suosituksen kysymyksiä:

1. Luvun 6.4 tutkimustulosten perustella ei voida tehdä varmoja päätöksiä balusterikaiteen eri osien betonista. Tutkimustuloksissa esiintyy neljää eri betonivaihtoehtoa, joiden esiintyminen betonikaiteessa on epäselvää. Tämän lisäksi maasuonikuonabetonin ikä-arviota ei voida tehdä tutkimustulosten perustella.

Kansallisarkiston balusterikaiteen kohdalla on suositeltava tutkia korjauskohdetta ja sen betoniominaisuuksia enemmän. On suositeltava tehdä koko balusterikaiteen yksityiskohdasta silmämääräistä kuntoselvitystä ja sen pohjalta laatia uusi kuntotukitusohjelma. Kuntotukitusohjelman laatimisessa on suositeltava hyödyntää luvun 7.1 suosituksia. Tämän mukaan on suositeltava tehdä ensin betoninäytteiden ohuthieanalyysiä ja tarpeen mukaan määrittää lisätutkimuksia.

8 Johtopäätökset

8.1 Yhteenveto

Betoneita alettiin kehittää johdonmukaisesti 1800-luvulla. Kehityssuuntia oli monia ja tästä johtuen betoneiden ominaisuudet vaihtelivat paljon. Lisäksi rakentamisen tieto ja taito perustui pitkälti kokemuseräiseen osaamiseen. Kehitys ja tiedon kulkeutuminen oli suhteellisen hidasta ja harvoin dokumentoitua. Lisäksi paikallisten raaka-aineiden ominaisuuksilla oli suuri vaikutus betonien ominaisuuksiin. Näin ollen betonissa oli myös huomattavia paikallisia vaihteluita.

Vuosien 1840–1930 betoniteknologian kehityksen seurauksena betonin ominaisuudet parantuivat merkittävästi, joka vaikutti betonin yleistymiseen rakennusmateriaalina. Merkittävien kehitysaskel oli sideaineiden kehittyminen. 1800-luvulla ja 1900-luvun alussa betonin valmistuksessa käytettiin monia erilaisia sideaineita, jotka voidaan jakaa kahteen pääluokkaan: hydraulinen kalkki ja historiallinen sementti. Betonirakentamisen yleistymisen kannalta merkittävin sideaine on portlandsementti, jota alettiin käyttää laajasti 1900-luvun alussa. Portlandsementin kehitys alkoi jo 1800-luvulla, mutta käyttö levisi vasta myöhemmin, kun sementin valmistusteknologiat kehittyivät ja tehostuivat (sementin polttoteknologian kehittyminen). Sideaineiden kehityksen lisäksi betonin laadun parantamiseen vaikuttivat merkittävästi betonin suhteituksen kehitys, betonin valmistusmenetelmien kehitys 1800-luvun loppupuolella ja 1900-luvun alussa.

Merkittävin ero modernissa ja historiallisissa sideaineissa on sideaineen mikrokoostumus. Aliitin (C_3S) pitoisuus moderneissa sementeissä on noin 60 % ja beliitin (C_2S) pitoisuus noin 10–15 %, kun taas historialliset sideaineet ovat yleensä beliittipitoisia. Tämä johtuu sideaineen polttoteknologian vajaavaisuudesta. Historiallisissa sementeissä beliitin pitoisuus oli korkea alhaisten polttolämpötilojen johdosta. Korkean beliittipitoisuuden seurauksena historiallisten betonien lujuudenkehitys on hitaampaa ja lujuus ei saavuta vastaavaa tasoa kuin moderni betoni. Lujuudenkehityksen hitauteen vaikutti myös sideaineiden klinkkerin raekoko, joka oli verrattain karkeaa moderniin sementtiin verrattuna. Suuren klinkkerin raekoon johdosta historiallisten sideaineiden (veden kanssa reagoiva) pinta-ala oli selvästi pienempi kuin hienompijakoisten modernien sementtien. Voidaan arvioida, että puristuslujuuden arvo nousi arvosta 5 MPa arvoon 25 MPa vuosina 1840–1930 ensisijaisesti sideaineen kehittymisen ansiosta.

1800-luvun loppupuolella betonia käytettiin Suomessa pääosin perustuksiin, vesirakenteisiin ja esivalmistettuihin elementteihin kuten viemäriputkiin ja julkisivun koriste-elementteihin. Betoniteknologian kehitys aiheutti betonirakentamisen yleistymisen 1900-luvun alussa myös Suomessa. Betonia käytettiin Suomessa 1900-luvun alun pääasiassa moderneissa teollisuus- ja liikerakennuksissa sekä julkisissa rakennuksissa. 1900-luvun alussa betoniala oli melko suppea. Suomessa toimi viisi kotimaista betonirakentamisen yritystä, joiden lisäksi Suomessa toimi joitakin ulkomaalaisia toimijoita (pääosin Ruotsista ja Venäjältä mutta myös jonkin verran Euroopasta). Lisäksi alan suppeutta kuvaa hyvin se, että Suomessa kaksi kotimaista sementtitehdasta alkoi toimia vasta 1910-luvulla.

Kokeellisessa tutkimuksessa tutkittiin kahden case-kohteen historiallisten betonien mikrorakennetta ja –koostumusta hyödyntäen optisia ja kemiallisia menetelmiä, sekä röntgensäteilyyn pohjautuvia ja termoanalyttisiä menetelmillä. Kokeellisen tutkimuksen case-kohteet oli Säätytalon suihkulähde ja Kansallisarkiston balusterikaide. Case-kohteiden tutkimukset tekivät tutkimuskeskuksen Eurofins Expert Services betonitutkimuksen asiantun-

tijat. Case-kohteiden tutkimustuloksia vertailtiin kohteiden aikaisempien tutkimustuloksiin. Diplomityön kokeellisessa tutkimuksessa selvitettiin näytteiden betonien seossuhteet, lisäaineiden tyypit, huokosrakenteet, betonirakenteen yleinen kunto ja kiviainesten maksimiraekoot ja laatu. Betoninäytteiden sideainetyypit jäivät kuitenkin selvittämättä tarkasti.

Vaikka tutkimuskeskuksen Eurofins Expert Servis tutkijat toteavat, että betoninäytteet eivät edusta pääosin alkuperäistä historiallista betonia, diplomityössä esitetyn laboratoriotutkimustulosten ja silmämääräisen kuntoselvityksen analyysien perustella voidaan kuitenkin olettaa, että suurin osaa suihkulähteen rakenneosista ovat alkuperäiset 1800-luvun rakenteita. On hyvin todennäköistä, että aliitin pitoisuus suihkulähteen sideaineissa on pienempi verrattaessa moderneihin sementteihin. Voidaan olettaa, että suihkulähteen sideaine on varhaista keinotekoisista sementtiä tai historiallista portlandsementtiä. Suihkulähteen kamion betonirakenteiden ja julkisivun rakenneosien betonit ovat koostumukselta erilaisia keskenään. Säätytalon suihkulähteen korjausta suositellaan tehtäväksi pääosin restaurointitai entisöintimenetelmillä. On suositeltavaa kehittää korjausbetoni korjauskohdekohtaisesti niin, että korjausbetoni vastaisi ominaisuuksiltaan mahdollisimman paljon suihkulähteen alkuperäisiä historiallisia betoneita.

Kansallisarkiston balusterikaiteen erivuosisien tutkimustulokset eroavat erittäin paljon toisistaan erityisesti side- ja seosaineiden osalta. Tutkimuskeskuksen Eurofins Expert Services tutkijoiden betoninäytteiden ikäarviosta huolimatta, diplomityössä esitetyn laboratoriotutkimustulosten analyysin perustella balusterikaiteen osat saattavat olla osittain alkuperäisiä. Aikaisemmin tutkitut betoniosat ovat suurella todennäköisyydellä uusittuja 1900-luvun loppupuolen korjauksen yhteydessä. Koska tutkimustulosten perustella ei voida tehdä varmoja päätöksiä balusterikaiteen eriosien betonien alkuperästä ja koostumuksista, Kansallisarkiston balusterikaiteen kohdalla on suositeltavaa tutkia korjauskohdetta laajemmin jatkotutkimusten avulla. On suositeltavaa tehdä koko balusterikaiteen yksityiskohtainen silmämääräinen kuntoselvitys, jonka pohjalta voidaan määrittää uusia betoninäytteenotto-paikkoja. On suositeltavaa tehdä ensin betoninäytteiden ohuthieanalyysiä ja tarpeen mukaan ohuthieanalyysin tulosten perustella määrittää lisätutkimuksia.

Kokeellisen tutkimuksen aikana tuli esille monia historiallisten betonien tutkimuksiin liittyviä puutteita ja haasteita, jotka voivat johtaa tutkimustulosten vääristymiseen ja virhelisien korjausbetonien valintaan. Merkittävimmät historiallisten betonien tutkimuksen haasteet liittyvätkin yleensä sideainetyypin riittämättömään määrittämiseen sekä betonin iän arvioinnin vaikeuteen.

Ottamalla huomioon kokeellisessa tutkimuksessa esille tulleet puutteet ja haasteet, diplomityössä laadittiin suositus ennen vuotta 1930 valmistettujen betonirakenteiden kuntoselvityksen suorittamiseksi. Suosituksen tarkoitus on ohjata kuntoselvitystä mahdollisimman luetettaviin lopputuloksiin. Suosituksessa pyrittiin tehostamaan historiallisten betonirakenteiden tutkimuksia, parantamaan tutkimustulosten laatua ja vähentämään betoninäytteiden määrää (alkuperäisen rakenteen vaurioittamisen minimoimiseksi). Suosituksessa on korostettu kattavan taustatiedon tärkeyttä ja tarkan silmämääräisen kuntoselvityksen merkitystä korjauskohteen kunnostuksessa.

Historiallisia betoneita suositellaan tutkimaan ensisijaisesti ohuthieanalyysillä, koska tällä hetkellä ohuthieanalyysi on tehokkain ja yleisin tutkimusmenetelmä betonien mikrorakenteen tutkimiseen. Ohuthieanalyysissä voidaan arvioida tarkasti historiallisten betonien monia ominaisuuksia mikrorakenteen avulla. Historiallisten betonirakenteiden kohdalla ylimääräisten laboratoriotutkimusten tarve tulee miettiä tarkkaan, jotta porausnäytteiden mää-

rää saadaan pidettyä mahdollisimman pienenä. Mahdollisuuksien mukaan laboratoriotutkimuksia voidaan korvata kenttätutkimuksilla tai ohuthieanalyysillä, jotka vaurioittavat rakennetta suhteessa vähän.

Diplomityön yhteydessä laadittiin myös ennen vuotta 1930 valmistettujen betonirakenteiden korjaussuunnitelman valinnan suositus. Suosituksen tarkoitus on helpottaa korjausmenetelmien ja korjausbetonin valintaa. Suosituksen korjaustoimenpiteet on jaettu viiteen osa-alueeseen jotka ovat:

- I. vaurioiden etenemisen seuraaminen,
- II. korjaus moderneilla korjausmenetelmillä ja -materiaaleilla,
- III. purku ja uudelleenrakentaminen,
- IV. säilyminen konservointimenetelmillä,
- V. korjaus restaurointi- tai entisöintimenetelmillä.

Korjaussuunnitelmaan valintaan vaikuttavat betonirakenteiden rakentamisen ajankohta, betonirakenteiden kunto, rakenteen käyttöaste ja kulttuurihistoriallinen arvo sekä korjauksen taloudellinen kannattavuus.

8.2 Tavoitteiden saavuttaminen

Diplomityön alussa asetettiin kolme tavoitetta:

1. Selvittää vuosina 1860–1930 valmistettujen betonien ominaisuuksia
2. Selvittää millä tutkimusmenetelmillä voidaan tutkia tehokkaasti historiallisia betoneja.
3. Antaa suosituksia korjausmenetelmän ja -betonin valintaan kerätyn tutkimustulosten pohjalta.

Vuosina 1860–1930 valmistettujen betonien ominaisuuksia tutkittiin laajasti kirjallisuuskatsauksen ja kokeellisen tutkimuksen avulla. Kirjallisuuskatsauksessa selvitettiin historiallisten betonien yleisiä ominaisuuksia sekä niiden syitä. Kokeellisessa tutkimuksessa sovellettiin kirjallisuustietoja case-kohteiden betonien ominaisuuksien määrittämiseen. Casekohteiden tutkimustulokset vahvistivat osittain kirjallisuuskatsauksen tietoja historiallisten betonien mikrorakenteesta ja -koostumuksesta. Osa case-kohteiden betonien ominaisuuksista jäi kuitenkin selvittämättä kokeellisen tutkimuksen puutteista ja haasteista johtuen.

Historiallisten betonien yleisiä tutkimusmenetelmiä käsiteltiin laajasti kirjallisuuskatsauksessa ja kokeellisessa osiossa. Kokeellisen osion tutkimustulosten perustella selvitettiin historiallisten betonien tutkimusten tyypillisiä puutteita ja haasteita. Lopputuloksena luotiin suositus ennen vuotta 1930 valmistettujen betonirakenteiden kuntotutkimuksen suorittamiselle.

Vuosina 1860–1930 valmistettujen betonirakenteiden korjausmenetelmiä käsiteltiin vain yleisellä tasolla. Diplomityön yhteydessä laadittiin ennen vuotta 1930 valmistettujen betonirakenteiden korjaussuunnitelman valinnan suositus. Lisäksi tehtiin ehdotukset casekohteiden korjaustoimenpiteiden ja jatkotutkimusten osalta.

8.3 Jatkotutkimusmahdollisuudet

Tämä diplomityö antaa hyvän pohjan vuosina 1860–1930 valmistettujen betonien jatkotutkimuksiin. Diplomityö sisältää yleisiä tietoja historiallisten betonien ominaisuuksista ja niiden syistä sekä tutkimus- ja korjausmenetelmistä.

Kokeellisessa tutkimuksessa kartoitettiin historiallisten betonien tutkimuksen puutteita ja haasteita, joiden ratkaiseminen vatti perusteellista tutkimusta. Tutkimusmenetelmien sovel-

taminen historiallisten betonien tutkimuksiin on varsin ajankohtainen tutkimusaihe. Jatko-tutkimusehdotuksena suosittelen tutkimaan miten ohuthieanalyysillä olisi mahdollista saada yksiselitteisiä ja tarkkoja tutkimustuloksia historiallisten betonien mikrorakenteesta ja -koostumuksesta. Lisäksi pyyhkäisyelektronimikroskooppianalyysin ja termogravimetrinen menetelmän käyttöä historiallisten betonien mikrorakenteen ja -koostumuksen tutkimisessa on jatkotutkimusmahdollisuuksia.

Historiallisten betonien korjausmenetelmiä ja -betonia käsiteltiin diplomityössä vain yleisesti, joten korjausrakentamisessa on edelleenkin tarvetta tutkia aihetta tarkemmin. Koska historiallisten betonirakenteiden korjaamisessa ei ole suositeltavaa käyttää moderneja korjausbetoneja, voisi eräs jatkotutkimuslinja olla sopivien korjausbetonireseptien kehittäminen ja analysointi. Lisäksi historiallisten betonien ja sopivien korjausbetonien ikääntymismekanismien tutkiminen voisi olla hyödyllistä.

Lähdeluettelo

Valokuvat ovat tekijän, ellei toisin mainita

Aikakauslehdet

Helsingin Sanomat
Suomen Kuvalehti
Teknillinen aikakauslehti

Arkistolähteet

Helsingin kaupunginmuseo 1. *Säätytalon (Nikolainkadulla, nyk. Snellmanninkatu) takafasadi kuvattuna Ritarikadun suunnasta, etualalla Säätytalon puisto*. Valokuvaaja: Hausen R. Saattavilla: <https://www.finna.fi/Record/hkm.HKMS000005:km0000o8yw>. Viitattu 25.10.2018.

Helsingin kaupunginmuseo 2. *Helsingin rautatieasema Kaivokadun ja Rautatientorin kulmasta nähtynä*. Valokuvaaja: Sundström E. Saattavilla: <https://www.finna.fi/Record/hkm.HKMS000005:km0000msha>. Viitattu 5.8.2019.

Helsingin kaupunginmuseo 3. *Ateneumin taidemuseo, Kaivokatu 2-4, valmistunut 1887, arkkitehti Theodor Höijer*. Valokuvaaja: tuntematon. Saattavilla: <https://www.finna.fi/Record/hkm.HKMS000005:km0000lo4m>. Viitattu 5.8.2019.

Helsingin seurakuntayhtymän keskusarkisto. *Johanneksen kirkon peruskorjaustyöasiakirjat vuosilta 1990–91*. Helsinki.

Museovirasto 1. *Sigurd Frosteruksen suunnittelema, vuonna 1930 valmistunut Stockmannin tavaratalo Helsingin keskustassa*. Valokuvaaja: Pietinen A. Historian kuvakokoelma. Saattavilla: <https://www.finna.fi/Record/musketti.M012:HK19731119:3907>. Viitattu 5.8.2019.

Museovirasto 2. *Valtionarkisto, Snellmaninkadulta kuvattuna, Valtionarkiston lisäsiipi valmistui 1928*. Valokuvaaja: Faltin A. Historian kuvakokoelma, inventaarionumero HK19730318:261. Saattavilla: <https://www.finna.fi/Record/musketti.M012:HK19730318:261>. Viitattu 24.8.2019.

Åbo Akademi. *Riksarkivet i Finland*. Valokuvaaja: Edlund, G.W. Saattavilla: https://www.finna.fi/Record/spegeln-bildsamlingarna.bildsam_1999_86:27. Viitattu 5.8.2019.

Haastattelut

Klami, J. 2019. Haastattelu 20.8.2019. Haastattelijana Valeryia Pulko.

Koskinen, P. 2019a. *Säätytalon suihkulähteen ja kansallisarkiston balusterikaiteen betoni-tutkimus*. Yksityinen sähköpostiviesti 26.4.2019. Viestin saaja: Valeryia Pulko.

Koskinen, P. 2019b. Haastattelu 20.8.2019. Haastattelijana Valeryia Pulko.

Punkki, J. 2019. Haastattelu 20.8.2019. Haastattelijana Valeryia Pulko.

Winterhalter, K. 2018. Haastattelu 22.10.2018. Haastattelijana Valeryia Pulko.

Internet-lähteet

Cementkilns. *Early rotary kilns*. Saattavilla:

https://www.cementkilns.co.uk/early_rotary_kilns.html. Viitattu 19.6.2019.

Klami, J. 2018. *Betonin optiset menetelmät. Kurssimoniste*. Saattavilla:

http://www.betoniyhdistys.fi/media/4-klami_betonin-optiset-tutkimusmenetelmat-2018.pdf
Viitattu 15.2.2019.

Pörssitieto. *Osakekirjat: luettelo H–K*. Saattavilla:

<https://www.porssitieto.fi/osake/listhk.html>. Viitattu 9.11.2018.

Senaatti 1. *Kansallisarkisto*. Saattavilla:

<https://www.senaatti.fi/arvokiinteisto/kansallisarkisto/>. Viitattu 6.3.2019.

Senaatti 2. *Säätytalo*. Saattavilla: <https://www.senaatti.fi/arvokiinteisto/saattytalo/>. Viitattu 6.3.2019.

Freedom Cement. *Century Brand Natural Cement*. Saattavilla:

<http://www.freedomcement.com/products/century-brand-natural-cement>. Viitattu 13.9.2019

Edison Coating Inc. *Rosendale 16 B*. Saattavilla:

http://www.edisoncoatings.com/ROSENDALE_16B.pdf. Viitattu 13.9.2019

Julkaisemattomat lähteet

Betonialan Ohuthiekeskus FCM Oy. 2009. *Tutkimusselostus nro 052709, 29.05.2009*.

Contesta Oy. 2010. *Tutkimusselostus B-6956. Kansallisarkiston kaiteen kuntotutkimus*.

Eurofins Expert Services. 2019. *Tutkimusraportti EUFI29-19000245-T1. Säätytalon suihkulähteen ja Kansallisarkiston balusterikaiteen betonirakenteet*.

Insinööritoimisto Lauri Mehto Oy. 2011. *Västanfjärdin uusi kirkko. Kuntotutkimusraportin liitteet*.

Insinööritoimisto Lauri Mehto Oy. 2013. *Helsingin päärautatieasema. Pääsisäänkäynti ja itäinen sisäänkäynti. Kuntotutkimusraportin liitteet*.

Insinööritoimisto Lauri Mehto Oy. 2014. *Kansallismuseon torni. Välipohjat. Kuntotutkimusraportin liitteet*.

Insinööritoimisto Lauri Mehto Oy. 2016. *Helsingin päärautatieasema. Kellotornin itäsivun terassin alapuolisen kellaritilan kuntotutkimusraportti 8.7.2016*.

Insinööritoimisto Lauri Mehto Oy. 2018. *Säätytalon suihkulähde. Betonirakenteiden kuntotutkimus 23.11.2018*.

Konov, T.v. 2003a. *Historiallisen betonin analyysit ja korjaus. Hangon satama. Huokaus-
ten silta ja Englannin makasiini.*

Konov, T.v. 2003b. *Historiallisen betonin analyysit ja korjaus. Paimion sairaala. Ruusu-
kellari.*

Konov, T.v. 2004. *Historiallisen betonin analyysit ja korjaus. Historialliset betonit Suo-
menlinnassa.*

Konov, T.v. 2005. *Historiallinen betoni. Kirjallisuustutkimus.*

Ohuthiekeskus Oy. 2018. *Tutkimusselostus K071418. Säätytalon suihkulähteen betonira-
kenteet*

T. Sonninen Oy. 2011. *Valtion taidemuseo, Ateneum. Pohjoisfasadin huoltomaalaustyön
dokumentointi.*

Vahanen Oy. 2011. *Helsingin kansallisarkisto. Reliefinäytteiden laboratorioanalyysit. Ra-
portti 17.6.2011.*

Julkaisut

Abrams, D.A. 1919. *Design of concrete mixtures.* Chicago: Structural Materials Research
Laboratory, Lewis Institute.

Ahlberg, O.S. 2012. *Suojele betonia.* Mölndal: Göteborgstryckeriet. ISBN 978-91-7333-
491-4.

Asp, G. E. 1908. *Huonerakenteiden oppi: Rautarakenteet ja rautabetonirakenteet.* Turku:
Turun Suomalainen Kirjapaino- ja Sanomalehti Oy.

Brocklebank, I. 2006. *The lime spectrum.* Context - the journal of the Institute of Historic
Building Conservation 97, 21-23.

Saattavilla: <http://www.ihbconline.co.uk/context/97/index.html#22>.

Callebaut K., Elsen J., Van Balen K. & Viaene W. 2000. *Nineteenth century hydraulic
restoration mortars in the Saint Michael's Church (Leuven, Belgium): Natural hydraulic
lime or cement?* Cement and Concrete Research 31/3 (2001), 397-403. Saatavilla:
[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00499-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00499-3).

Elsen, J. 2005. *Microscopy of historic mortars—a review.* Cement and Concrete Research,
36/8 (2006), 1416-1424. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.12.006>.

English heritage. 2012. *Practical building conservation. Concrete.* UK, Farnham: Ashgate
Publishing Limited. ISBN 9780754645658.

Finnsementti. 2012. *Suomalainen sementti.* Verkkojulkaisu. Viitattu: 3.12.2018. Saatavilla:
http://www.finnsementti.fi/files/pdf/FS_Suomalainen_sementti_kirjanen_071112.pdf.

- Geitlin, B. & Troupp, N. V. 1924. *Portlandsementti ja sen käyttö*. Suomennos. Helsinki: Mercator'in Kirjanpaino Osakeyhtiö.
- Gottgetreu, R. 1881. *Baumaterialien*. Saksa, Berlin: Verlag von Julius Springer.
- Halonen, M.M.K. 2001. *Helsingin Johanneksen kirkon 1879–1891 betoniornamentiikka ja ornamentiikan dokumentointimenetelmät peruskorjauksen yhteydessä vuonna 1991*. Jyväskylän yliopisto. Taiteen ja kulttuurin tutkimuksen laitos. Pro gradu -tutkielma.
- Heikkinen, A. & Konow, T. v. 1992. *Betonin mikrosuhteitus*. Helsinki: Betonitieto. ISBN 951-9365-52-4
- Hellebois, A., Launoy, A., Pierre, C., De Lanève, M., & Espion, B. 2013. *100-year-old Hennebique concrete, from composition to performance*. Construction and Building Materials 44, 149-160. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.017>.
- Helsingin kustannusosakeyhtiö. 1913. *Kotimaisen teollisuuden albumi: Album öfver den inhemska industrin*. Helsinki: Helsingin kustannusosakeyhtiö Oy.
- Hughes, D., Swann, S. & Gardner, A. 2007. *Roman cement*. Journal of Architectural Conservation 13 (2014), 21–36. Saatavilla: <https://doi.org/10.1080/13556207.2007.10784986>.
- Huhtonen, S. 2017. *Betonin huokosjako – koekappaleen valmistusvirheen vaikutus testaustulokseen*. Kaakois-Suomen ammattikorkeakoulu, rakennustekniikan laitos. Opinnäyte-työ.
- Hurme, R. ja muut. 1991. *Betoni Suomessa 1860-1960*. Helsinki: Suomen betoniyhdistys r.y. ISBN 951-9365-48-6.
- Jonh, D. A. St, Poole, A. W. & Sims, I. 1998. *Concrete Petrography. A handbook of investigative techniques*. UK: Somerset, Bookcraft Ltd. ISBN 0 340 69266 9.
- Jonh, Poole & Sims 1998,
- Kaila, P. 2000. *Talotohtori. Rakentajan pikkujättiläinen 6. painos*. Porvoo: WSOY-painoyksikkö. ISBN 951-0-19420-4.
- Konow, T.v. 2006. *Laastit vanhoissa rakenteissa*. Helsinki: Suomenlinnan hoitokunta. ISBN 978-951-9437-31-6.
- Kuosa, H. & Vesikari, E. 2000. *Betonin pakkasenkestävyyden varmistaminen. Osa 1. Perusteet ja käyttöikämitoitus*. Espoo: VTT. ISBN 951-38-5748-4.
- Lehtonen, J. 2016. *Valumuurien korjauslaastien pakkasenkestävyyden kehittäminen*. Tampereen teknillinen yliopisto. Talouden ja rakentamisen tiedekunta. Diplomityö.
- Muoniovaara, M. 1922a. *Sementti ja sen käyttö. I. Portlandsementti. II. Sementtilaasti ja laastihiekka*. Helsinki: Rakentajain kustannus.
- Muoniovaara, M. 1922b. *Sementti ja sen käyttö. III. Betoni*. Helsinki: Rakentajain kustannus.

- Mattinen, M (toim.) 1997. *Valtion rakennusperinnön vaaliminen*. Helsinki: Museovirasto. ISBN 951-616-017-4.
- Neuvonen, P., Mäkiö, E. & Malinen, M. 2002. *Kerrostalot 1880-1940*. Helsinki: Rakennustietosäätiö. ISBN 951-682-668-7.
- Nykänen, A. 1951. *Betonin historian kehitys*. VTT Helsinki: Kirjanpaino Oy.
- Nykänen, V. 1911. *Rautabetoni: Pääpiirteinen esitys sen synnystä, ominaisuuksista, teoriasta ja käytäntötavoista*. Helsinki: Otava.
- Nykänen, V. 1913. *Lyhyt rautabetoniopas*. Helsinki: Otava.
- Pyykkö, H. 1992. *Rakennustyöstä. Johanneksen kirkko, peruskorjaustyö*. Helsinki: Helsingin seurakuntayhtymä.
- Reid, H. 1879. *A practical treatise on natural and artificial concrete: its varieties and constructive adaptations*. London: E. & F. N. Spon.
- Sarlin, E. 1925. *Paraisten kalkkivuori osakeyhtiön teollisuuslaitokset Paraisissa*. Suomenos. Helsinki: Paraisten kalkkivuori.
- Souponitski S.Z., Sniatkov S.V. & Grigoriev S.E. 1999. *Early reinforced concrete constructions in Russia: specific faults and causes of failure*. Engineering Failure Analysis 8 (2001), 201 – 212. Saatavilla: [https://doi.org/10.1016/S1350-6307\(99\)00046-1](https://doi.org/10.1016/S1350-6307(99)00046-1).
- Suomen Betoniyhdistys ry. 2002. *BY 42 Betonijulkisivun kuntotutkimus 2002*. Helsinki: Suomen Betoniyhdistys ry. ISBN: 952-5075-43-5.
- Suomen Betoniyhdistys ry. 2016. *BY 65 Betoninormit 2016*. Helsinki: Suomen Betoniyhdistys ry. ISBN: 978-952-68068-4-6.
- Suomen Betoniyhdistys ry. 2018. *BY 201 Betonitekniikan oppikirja 2018*. Helsinki: Suomen Betoniyhdistys ry. ISBN: 978-952-68619-4-4.
- Taylor, H.F.W. 1997 (1990). *Cement chemistry. 2 edition*. London: Thomas Telford Services Ltd. ISBN 0 7277 2595 0.
- Urquhart, D. 2013. *Short Guide. Historic Concrete in Scotland. Part 1: History and development*. Edinburgh: Historic Scotland. ISBN 978-1-84917-119-9.
- Urquhart, D. 2014a. *Short Guide. Historic Concrete in Scotland. Part 2: Investigation and assessment of defects*. Edinburgh: Historic Scotland. ISBN 978-1-84917-166-3.
- Urquhart, D. 2014b. *Short Guide. Historic Concrete in Scotland. Part 3: Maintenance and repair of historic concrete structures*. Edinburgh: Historic Scotland. ISBN 978-1-84917-167-0.
- Winterhalter, K., Bonsdorff, M., Sistonen, E., Mannerheimo, H. ja Mutanen, P. 2014. *Rotundan julkisivututkimus 2014*. Okulus Oy.

Weyerstall, O. 1913 (1912). *Sementti, betoni ja rautabetoni: Alkeisoppikirja*. Suomentanut Similä, Y. Helsinki: Kirja.

Zhao, C., Zhang, Y., Wang, CC., Hou, M. & Li, A. 2019. *Recent progress in instrumental techniques for architectural heritage materials*. Heritage Science (2019), 7-36. Saatavilla: <https://doi.org/10.1186/s40494-019-0280-z>

Standardit

ASTM C 666 Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing.

CEN/TR 15177 Testing the freeze-thaw resistance of concrete. Internal structural damage

SFS 5445 Betoni. Vetolujuus.

SFS 5447 Betoni. Säilyvyys. Jäädytys-sulatuskestävyys.

SFS-EN 12504-2 Betonin testaus rakenteista. Osa 2: Rikkomaton aineenkoetus. Kimmoarvon määrittäminen kimmovasaralla.

SFS- EN 12504-4 Testing concrete. Part 4: Determination of ultrasonic pulse velocity.

SFS EN 1504 Betonirakenteiden suojaus- ja korjausaineet ja niiden yhdistelmät. Määritelmät, vaatimukset, laadunvalvonta ja vaatimustenmukaisuuden arviointi.

SFS-EN 12390-3 Testing hardened concrete. Part 3: Compressive strength of test specimens.

SFS-EN 15801 Conservation of cultural property. Test methods. Determination of water absorption by capillarity.

SFS-EN 16085 Conservation of Cultural property. Methodology for sampling from materials of cultural property. General rules.

SFS-EN 16096 Kulttuuriperinnön vaaliminen. Rakennusperintökohteen selvitys ja raportti.

SFS-EN 16853 Conservation of cultural heritage. Conservation process. Decision making, planning and implementation.

Liiteluettelo

Liite 1. Historiallisen ajan betoniteknologian kehityksen lyhyt historia. 1 sivu.

Liite 2. Historiallisten betonien tutkimusmenetelmien kartoitus. 2 sivua.

Liite 3. Säätytalon suihkulähteen julkisivun silmämääräinen kuntoselvitys 22.11.2018. 17 sivua.

Liite 4. Ennen vuotta 1930 valmistettujen betonirakenteiden kuntotutkimuksen etenemisen suositus. 1 sivu.

Liite 5. Ennen vuotta 1930 valmistettujen betonirakenteiden korjaussuunnitelman valinnan suositus. 1 sivu

Liite 1. Historiallisen ajan betoniteknologian kehityksen lyhyt historia



Liite 2. Historiallisten betonien tutkimusmenetelmien kartoitus

Tutkimusohde	Ohuthieanalyysi	Vetolujuuden	Puristuslujuuden määrittäminen	Tyhjökylä- styskoe	Kapilaarinen vedelläimeytys- koe
Koriste-elementit					
Johanneksen kirkon julkisivun koristeet (1891)	1		1		1
Helsingin kansalliskirjaston Rotunda-rakennuksen julkisivun reliefit (1905)	1				
Helsingin kansalliskirjaston Rotunda-rakennuksen julkisivun betonivalokset (1905)	1				
Helsingin kansalliskirjaston Rotunda-rakennuksen julkisivun pilasteri (1905)	1				
Helsingin kansalliskirjaston päärakennuksen julkisivun veistokset (1908)	1				
	5	0	1	0	1
Kantavat rakenteet					
Suomenlinnan bastionin Polhemin lattia (1895)	1				1
Hangon sataman Huokausten silta (1905)	1				1
Hangon sataman Englannin makasiinin ulkoseinä (1907)	1				1
Kansallismuseon tornin välipohjat (1910)	1	1		1	
Västanfjärdin uuden kirkon kellotornin betonimuuri (1912)	1	1		1	
Helsingin päärautatieaseman kellotornin kellarihuoneen seinät ja katto (1914)	1	1		1	
Helsingin päärautatieaseman pääsisäänkäynnin katoslippa (1914)	1				
Helsingin päärautatieaseman itäisen sisäänkäynnin katto (1914)	1				
Suomenlinnan vanhan levyhallin pilasteri (1917)	1				1
Savitaipalen kirkon kiviseinän betonitausta (1924)	1				
Paimion sairaalan ruusukellarin holvikatto (1930)	1				1
	11	3		3	5
Tutkimusten määrä yhteensä	16	3	1	3	6

Kemiallinen menetelmä	Pyyhkäiselektro-nimikroskooppi-analyysi	Termoanalyytiset menetelmät	Röntgendiffraktiomenetelmä	Kiviainesrakeisuusjakauman määrittäminen seulomalla	Fenoliftaleiini-indikaattorimenetelmä	Kloridipitoisuuden määrittäminen	Asbestimäärittäminen	Tiheyden ja huokoisuuden määrittäminen vesiupotuksella
			1		1			
1		1		1				
1		1		1				
2	0	2	1	2	1	0	0	0
1	1		1	1				1
1	1		1	1				1
1	1		1	1				1
					1			
					1	1		
					1	1		
						1	1	
						1	1	
1	1		1	1				1
1	1		1	1				1
5	5	0	5	5	3	4	2	5
7	5	2	6	7	4	4	2	5

Liite 3. Säätytalon suihkulähteen julkisivun silmämääräinen kuntoselvitys 22.11.2018

1. Nimeäminen ja numerointi

Suihkulähteen rakennetta pystytään jakamaan maanpäällisin ja maanalaisiin rakenteisiin. Tässä tarkastelussa käsitellään vain maanpäällisen osan julkisivun kuntoa.

Silmämääräisen kuntotarkastuksen tulosten ilmaisun helpottamiseksi on laadittu nimeämisjärjestelmää. Sen tunnukset on avattu alla ja nimeämisen periaate on esitetty sivulla 3. Suihkulähte on ympyrämuotoinen. Julkisivuprojektiot on tehty ilmansuuntien mukaan. Ilmansuuntien osoittamiseksi on käytetty perinteisiä tunnuksia:

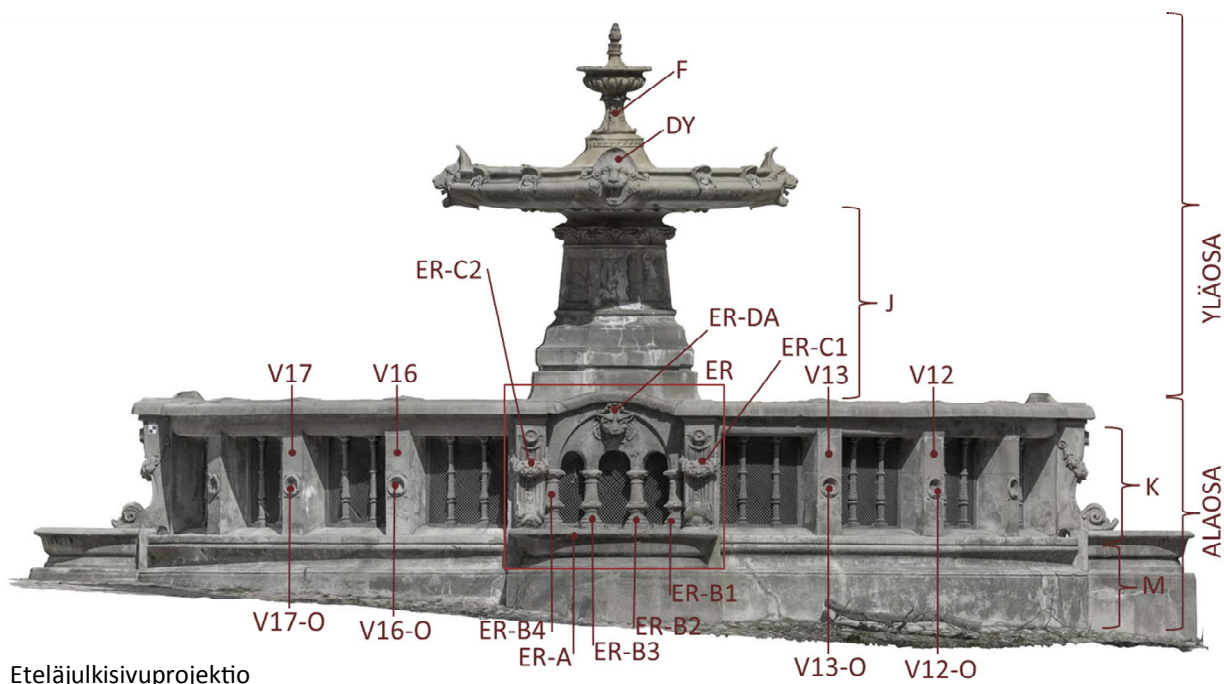
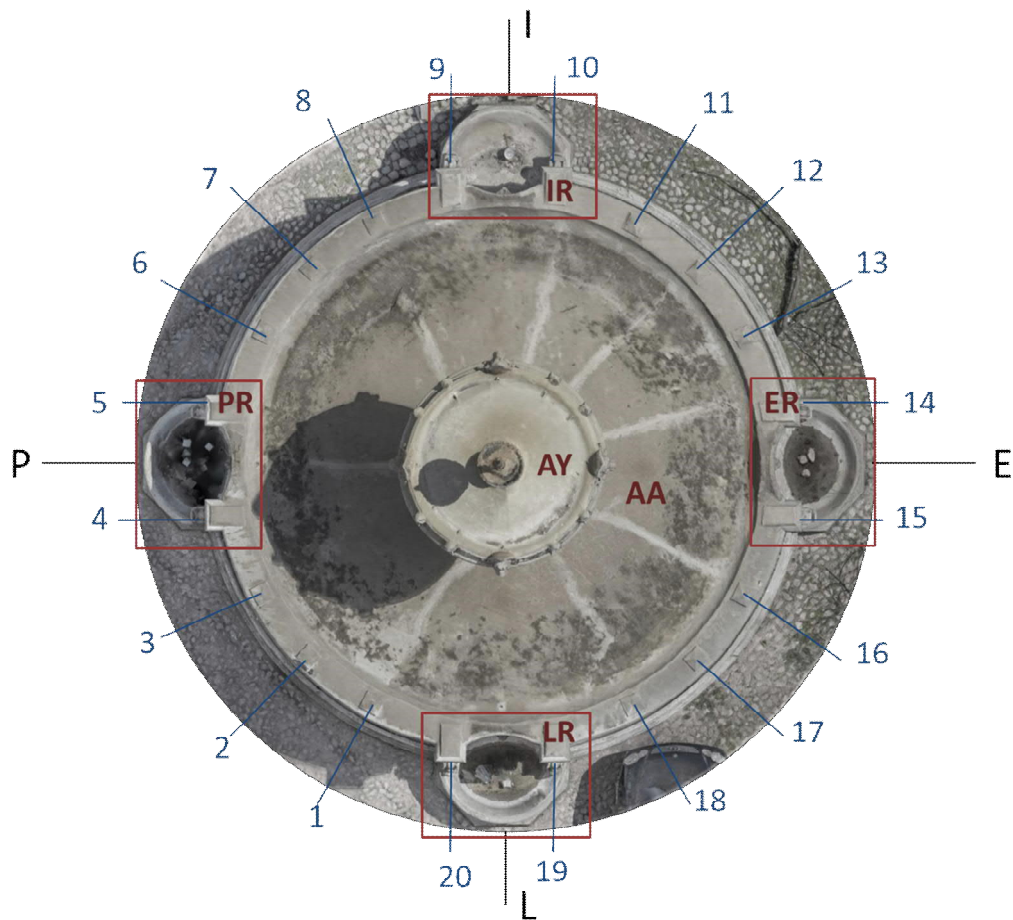
L = länsi
P = pohjoinen
I = itä
E = etelä

Suihkulähteen julkisivu pystytään jakaa ylä- ja alaosiin. Alaosaan kuuluvat seuraavat elementit:

- M = sokkeli.
- K = kaide, joka koostuu seuraavista elementeistä:
 - * V1 – V12 = betonipilarit,
 - * V1-O – V12-O = betonipilareiden ympyrämuotoinen koriste.
- R = koristeryhmä. Sen eteen tulee ilmansuunta ilmaiseva tunnus. Kaikki neljä koristeryhmä ovat samantapaisia ja niihin kuuluvat seuraavat elementit:
 - * R-B1 - R-B4 = koristeryhmän balusterit,
 - * R-C1 = koristeryhmän oikeanpuoleinen veistos,
 - * R-C2 = koristeryhmän vasemmanpuoleinen veistos,
 - * R-DA = koristeryhmän leijonan pää,
 - * R-A = koristeryhmän sivuvesiallas.
- AA = alaosan vesiallas, joka on suurin kaikista suihkulähteen vesialtaista.

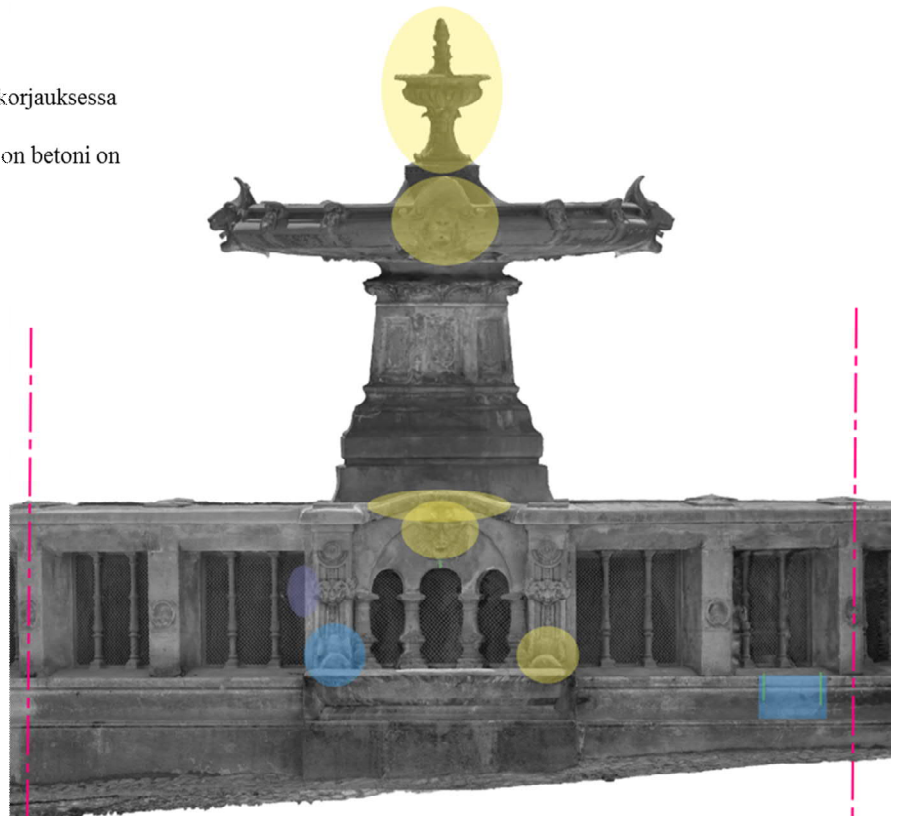
Suihkulähteen julkisivu koostuu seuraavista elementeistä:

- J = yläosan jalka.
- AY = yläosan vesiallas, joiden reunaa koristelee neljä seuraavaa koriste-elementtiä:
 - * DY = yläosan leijonan pää.
- F = amforamuotoinen vesilähde.



2. Julkisivun vauriot ja huomiot

- Uusitut osat aikaisemmassa korjauksessa
- Alueella pinnoite on kulunut on betoni on rapautunut

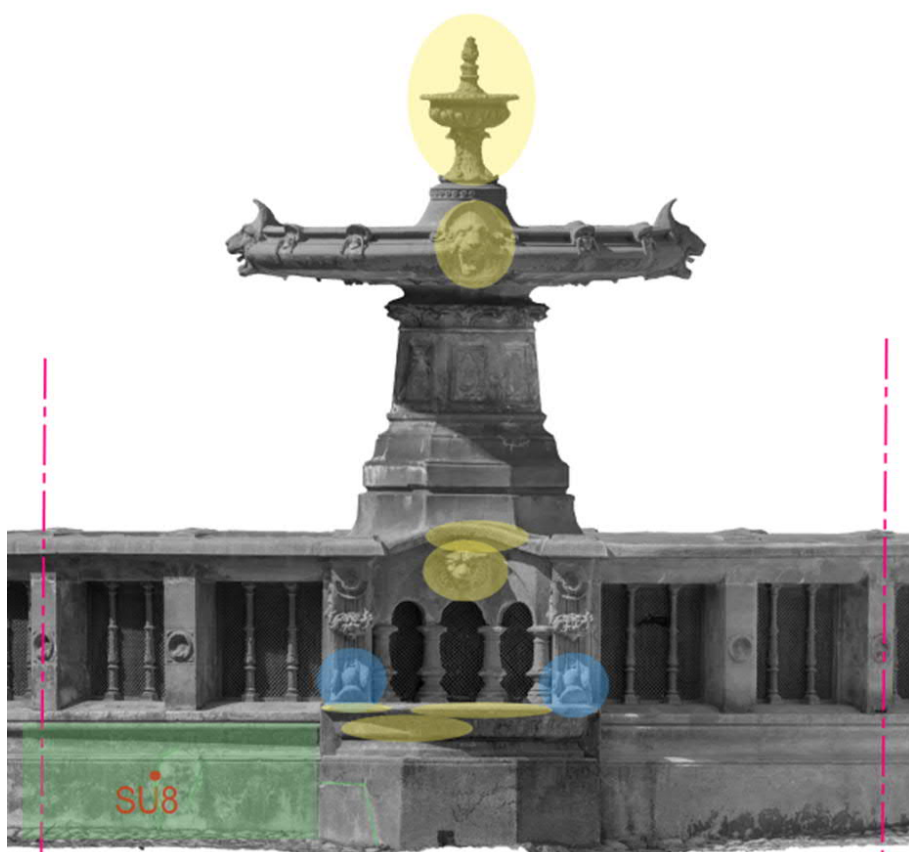


Pohjoisjulkisivuprojektio

- Lohkeama
- Alueella on paljon halkeamia
- / Yli 2 mm leveä halkeama

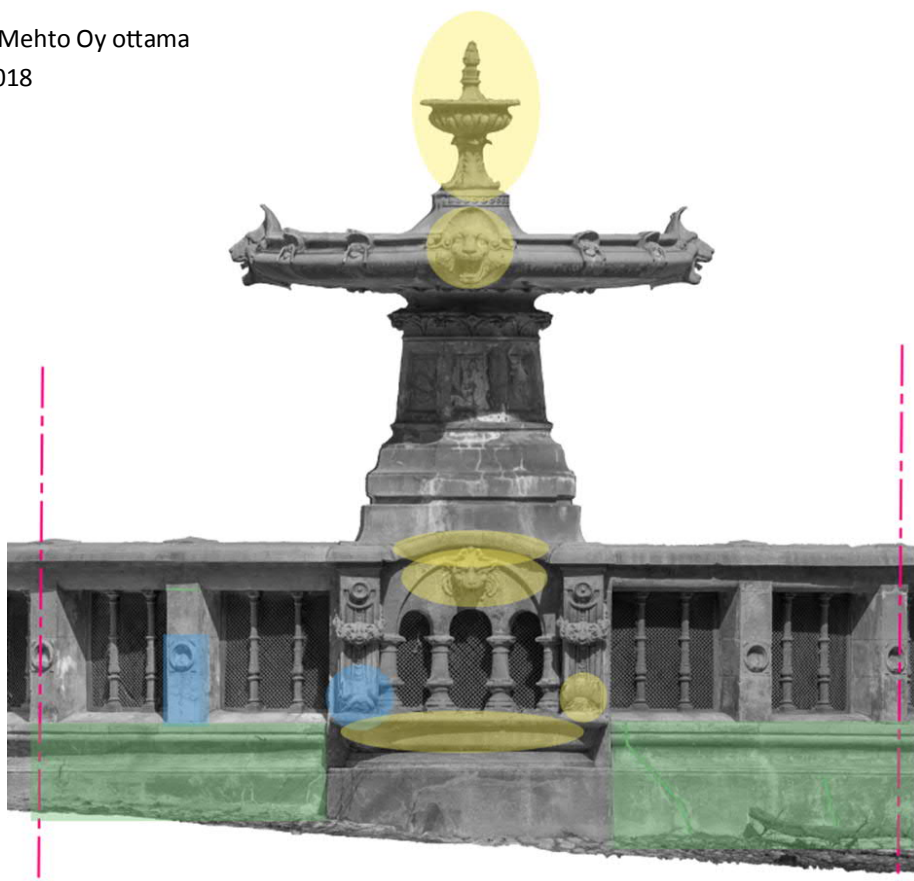


Länsijulkisivuprojektio



Eteläjulkisivuprojektio

- Insinööritoimiston Lauri Mehto Oy ottama poranäyte kesäkuussa 2018



Eteläjulkisivuprojektio

3.1 Koristeryhmien veistokset

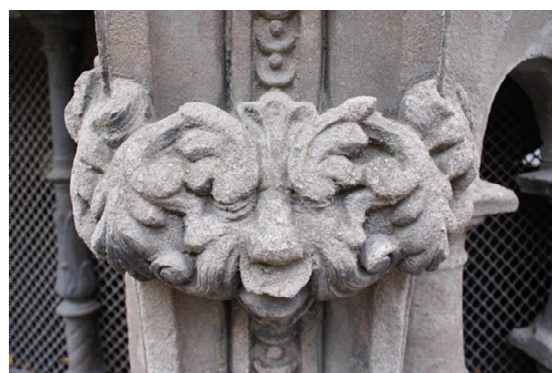
Suihkulähteen julkisivun veistosten PR-C2, ER-C2, IR-C1 JA IR-C2 on vaalettu uudelleen aikaisemmassa korjauksessa. Muut veistoksen osat vaikuttavat olevan alkupäisiä. Alaosan vesialtaan edellisessä korjauksessa lisätty pinnoite ulottuu veistoksen yläosan asti (kuva 5). Veistosten yläosassa olevat köynnösausaiheet koristeet ovat rapautuneet. Koristeiden muodot on paikoin vaikeasti hahmottavissa (kuvat 1, 3 ja 4). Samanlaista rapautumista on havaittavissa veistosten yläosissa olevissa ympyrämuotoisissa koristeissa (kuva 2).



KUVA 1. Veistoksen PR-C2 koristeet.



KUVA 2. Veistoksen LR-C2 pyöreämuotoinen koriste.



KUVA 3. Veistoksen LR-C2 köynnösausaiheinen koriste.



KUVA 4. Veistoksen ER-C2 köynnösausaiheinen koriste.



KUVA 5. Veistoksen LR-C2 yläosa.

3.2 Pohjoispuoleisen koristeryhmän veistosten päät

Vasemmanpuoleisen veistoksen (PR-C2) pää on vaalettu uudelleen aikaisemmassa korjauksessa. Betonimassa on vaaleampaa ja valusauma on selkeästi huomattavissa (kuvat 6 ja 7). Sivualtaan pinnoite ulottuu veistoksen alle. Oikeanpuoleisen veistoksen (PR-C1) pää teidenäköisesti on alkuperäinen. Silmämääräisen tarkastelun perustella betonin rapautumisaste on suurempi kuin muissa veistoksissa. Suuria halkeamia ei ole havaittavissa.



KUVA 1. Veistoksen PR-C2 pää sivusta.



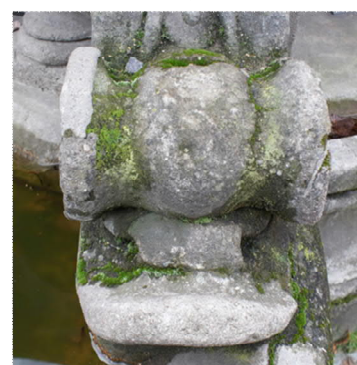
KUVA 2. Veistoksen PR-C1 pää sivusta.



KUVA 3. Veistoksen PR-C2 pää edestä.



KUVA 4. Veistoksen PR-C1 ja sivualtaan PR-A liitoskohta.



KUVA 5. Veistoksen PR-C1 pää edestä.



KUVA 6 ja KUVA 7. Veistoksen PR-C2 uuden pään valusauma.



KUVA 8. Veistoksen PR-C1 kaula.



3.3 Länsipuoleisen koristeryhmän veistosten päät

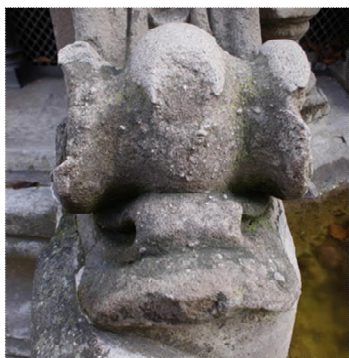
Molemmat veistokset (LR-C1 ja LR-C2) vaikuttavat olevan alkuperäisiä. Säänrasitusten johtuen veistosten päät ovat osittain rapautuneet. Betonin pinta on karhea. Pinnalla on melko paljon likaa ja orgaanista kasvustoa (kuva 4). Päiden ja silmien muotoja on kunnostettu aikaisemmassa korjauksessa (kuva 6). Halkeamat ovat veistoksen ja sivualtaan (LR-A) liitoskohdassa (kuva 7). Lisäksi sivualtaan pinoite puuttuu veistoksen liitoskohdasta.



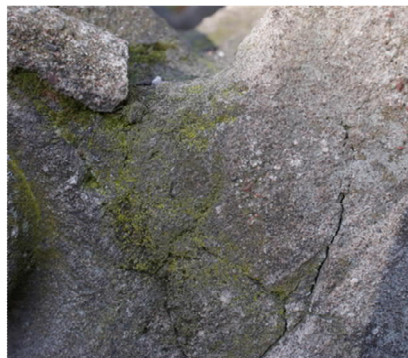
KUVA 1. Veistoksen LR-C2 pää sivusta.



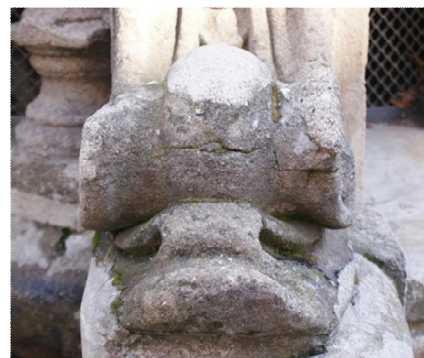
KUVA 2. Veistoksen LR-C1pää sivusta.



KUVA 3. Veistoksen LR-C2 pää edestä.



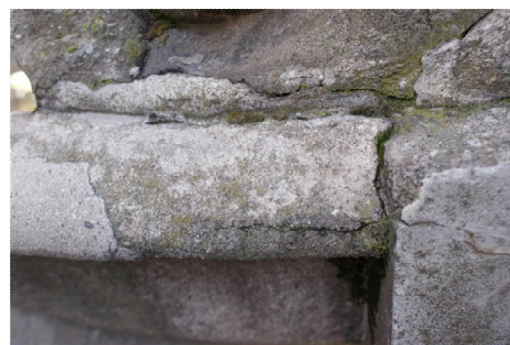
KUVA 4. Veistoksen LR-C1 kaula.



KUVA 5. Veistoksen LR-C1 pää edestä.



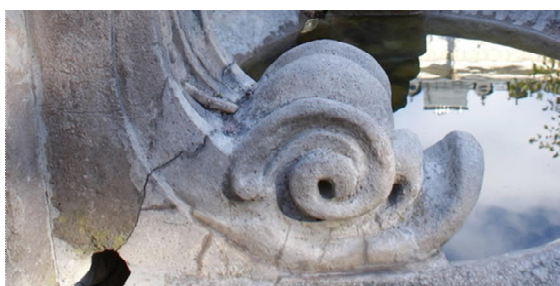
KUVA 6. Veistoksen LR-C2 pään yksityiskohdat.



KUVA 7. Veistoksen LR-C1 ja sivualtaan LR-A liitoskohta.

3.4 Eteläpuoleisen koristeryhmän veistosten päät

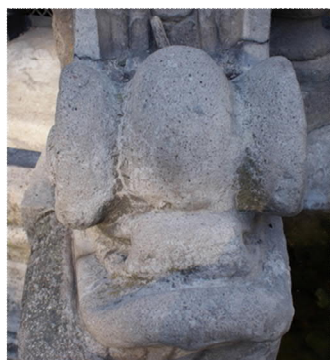
Vasemmanpuoleisen veistoksen (ER-C2) pää ja sen jalusta on vaalettu uudelleen aikaisemmassa korjauksessa. Uudessa osassa on havaittavissa merkkejä alkalikiviainesreaktiosta. Oikeanpuoleisen veistoksen (ER-C1) pää on todennäköisesti alkuperäinen. On havaittavissa halkeamia veistoksen ja sivultaan (ER-A) liittymiskohdassa sekä kaulassa (kuvat 2 ja 4) Pään arvioitaen on asennettu uudelleen paikalleen aikaisemmassa korjauksessa. Pään ulokeosa puuttuu ja on havaittavissa korjausjälkiä.



KUVA 1. Veistoksen ER-C2 pää sivusta.



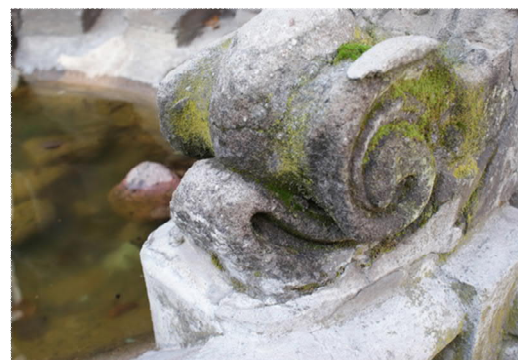
KUVA 2. Veistoksen ER-C1 pää sivusta.



KUVA 3. Veistoksen ER-C2 pää edestä.



KUVA 4. Veistoksen ER-C1 halkeama kaulassa



KUVA 5. Veistoksen ER-C1 pää edestä.



KUVA 6. Veistoksen ER-C2 liitoskohta.



KUVA 7. Veistoksen ER-C2 ja altaan ER-A liitoskohta.



KUVA 8. Veistoksen ER-C1 ja altaan ER-A liitoskohta.



3.5 Itäpuoleisen koristeryhmän veistosten päät

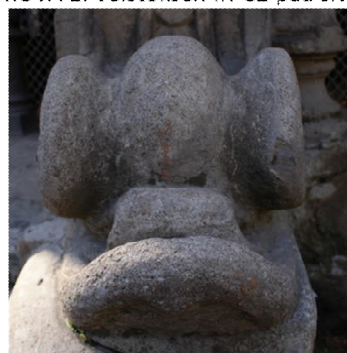
Molempien veistoksien (IR-C1 ja IR-C2) päät ovat vaalettu uudelleen aikaisemmassa korjauksessa. Vasemmanpuoleisen veistoksen (IR-C2) uuden ja vanhan osien liitoskohdassa on halkeama (kuva 4). Veistoksen IR-C2 jalustassa on havaittavissa suuri halkeama (kuva 6). Sivualtaan pinnoite ulottu veistosten alle.



KUVA 1. Veistoksen IR-C2 pää sivusta.



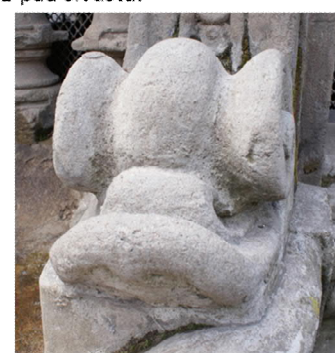
KUVA 2. Veistoksen IR-C1 pää sivusta.



KUVA 3. Veistoksen IR-C2 pää edestä.



KUVA 4. Veistoksen IR-C2 ja sivualtaan IR-A liitoskohta.



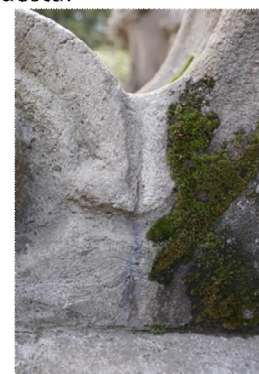
KUVA 5. Veistoksen IR-C1 pää edestä.



KUVA 6. Halkeama veistoksen IR-C2 jalustassa .



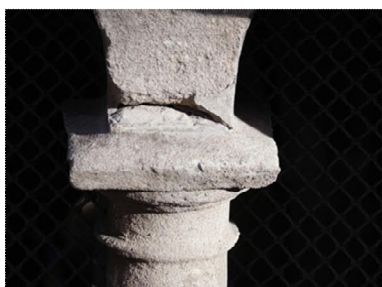
KUVA 7. Veistoksen IR-C1 ja sivualtaan IR-A liitoskohta.



KUVA 8. Veistoksen IR-C1 kaula.

3.6 Koristeryhmien bausterit

Jokaisen koristeryhmään kuuluu neljä balusteria (R-B). Balustereiden ala- ja yläpäissä on useita hakemia. Nämä halkeamat (kuvat 1, 4, 6 ja 7) saatavat viitata siihen, että balusterit on asennettu jälkikäteen. Balustereissa esiintyy paljon lohkeamia ala- ja yläpäissä (kuvat 2 ja 6). Veden aiheuttamat tummennukset on havaittavissa suihkulähteen länsipuolisilla balusteerien jalustoilla ja sivualtaan reunalla (kuvat 4 ja 5).



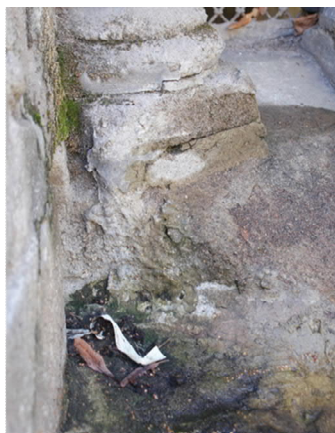
KUVA 1. Balusterin IR-B2 yläpää.



KUVA 2. Balusteri IR-B2.



KUVA 3. Balustereiden ER-B1 ja ER-B2 äläpää.



KUVA 4. Vesivaurion jäljet vesialtaan LR-A reunassa balusterin LR-B1 vieressä.



KUVA 5. Vesivaurion jäljet vesialtaan LR-A reunassa balusterin LR-B2 ja LR-B3 vieressä.



KUVA 6. Balusterin LR-B1 alapää.



KUVA 7. Balusterin IR-DA yläpää.

3.7 Koristeryhmien bausterit

Kaikki leijonan päät vaikuttavat olevan alkupäraisia. Betonin pintaa on kulunut ja patinoitu ajan myötä. Leijonan päät toimivat vedentuloaukoina. Jokaisen pään sisällä on metallinen suihkeputki, josta lähtee vesi alaosan altaasta sivualtaisiin. Suihkeputket ovat ruosteessa ja niiden päät ovat osittain vaurioituneet. Kaikkien leijonan päiden leuoista on lohjennut osia. Pohjoispuoleisen koristeryhmän leijonan pään (PR-DA) keskellä on noin 1 mm leveä halkeama (kuva 5). Läntispuoleisen koristeryhmän leijonan pään nenä on paljon kuluneempi kuin muiden leijonan päiden (kuva 3-4).



KUVA 1. Leijonan pää ER-DA edestä.



KUVA 2. Leijonan pää ER-DA sivusta.



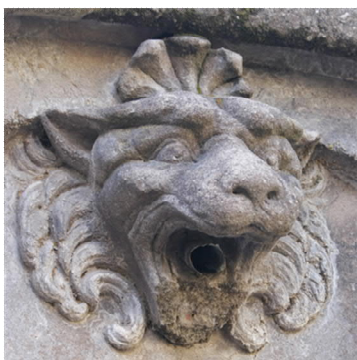
KUVA 3. Leijonan pää LR-DA edestä.



KUVA 4. Leijonan pää LR-DA sivusta.



KUVA 5. Leijonan pää PR-DA edestä.



KUVA 6. Leijonan pää IR-DA edestä.



KUVA 7. Leijonan pää IR-DA sivusta.



KUVA 8. Leijonan pää PR-DA sivusta.

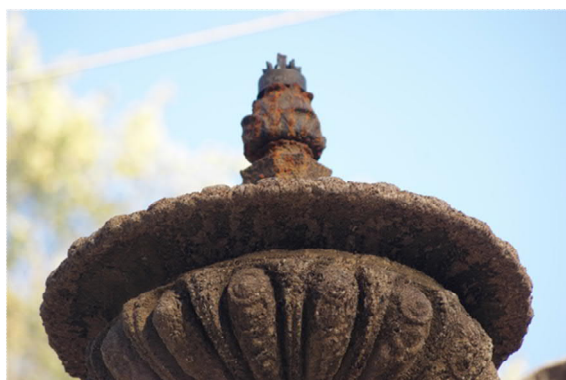
3.8 Eteläpuoleisen koristeryhmän veistosten päät

Pumppu nostaa vettä suihkulähteen yläosan hui-pussa olevan amfora-koristeen asti. Todennäköisesti rautaisen koristeellisen suihkeputken pää on ainakin ulkopinnasta ruostunut (kuva 1). Amforan (F) betonin pinta on paljon rapauttanut. Betoni vaikuttaa olevan erilaista kuin alaosien betoni. Yläosien betoni sisältää punasävyistä kiviainesta (kuva 2). Yläosan altaan (AY) kuntoa ei ole tutkittu tarkemmin. Tarvittaessa lisä tutkimusta on mahdollista suorittaa.

Yläosan altaan (AY) reunalla olevat pienet lehtikoristeet ovat hyvässä kunnossa. Mahdollisesti ne on korjattu aikaisemmassa korjauksessa. Yläosan vesialtaasta vesi valuu neljä metallista suihkeputkia pitkiin isompaan alaosan vesialtaaseen (AA). Suihkeputket ovat piilotettu neljän leijonan päiden sisälle. Niiden pinta on melko rapautunut ja kiviaineksen seoksessa on punasävyistä kiviainesta



KUVA 1. Yläosan altaan AY reunan koriste.



KUVA 2. Yläosan amfora F.



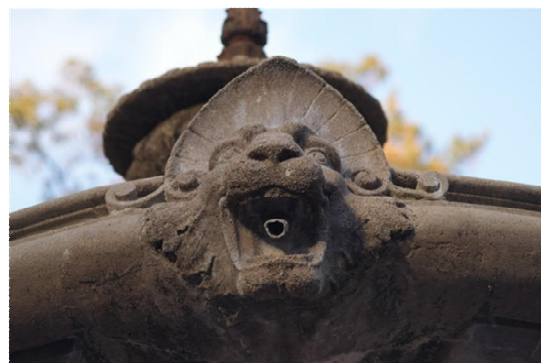
KUVA 3. Yläosan leijonan pää LDY.



KUVA 4. Yläosan leijonan pää PDY.



KUVA 5. Yläosan leijonan pää IDY.



KUVA 6. Yläosan leijonan pää EDY.



KUVA 1. Vesialtaan AA reuna.



KUVA 2. Alaosan vesiallas AA.



KUVA 3. Kaideosa (K) ikkunan kohdalla.

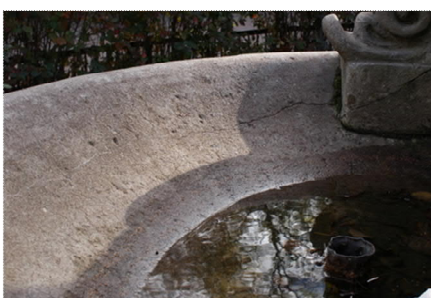
3.9 Vesialtaat

Silmämääräisen tarkastelun perustella on mahdollista toteaa, että alaosan vesiallas (AA) ja neljä sivualasta (R-A) on korjattu vuoden 1990 korjauksessa. Betonialan Ohuthiekeskuksen FCM tutkimuselostuksen Nro K071418 (23.7.2018) mukaan alaosan vesialtaan (AA) pinnoite on sementinpohjoista laastia. Sen paksuus on n. 12 mm ja runkoaineen suurin raekoko on #1,5 mm. Toteutuminen poikkeaa vuoden 1990 korjaussuunnitelmasta, jonka mukaan kaikki altaat olisi pitänyt käsitellä epoksinpinnoitteilla. Pinnoite jatkuu altaan reunan yli ja ylittyy kaideosan (K) yläpintaan asti (kuva 3).

Alaosan vesialtaan (AA) reunalla on vesialtaan säteensuuntaisia halkeamia koko sen reunan mitalla (kuva 1). Altaan reunaa kantaa kaideomainen osa (K), jossa on säännöllisin välein aukkoja suihkulähteen alla olevaan kammioon. Pinnoite puuttuu alaosan vesialtaan (AA) reunasta koristeryhmien kohdalla (kuva 4). Sivualtaiden pinnalla (R-A) on todenäköisesti samaa pinnoite kuin yläosan altaan pinnalla (AA). Idänpuoleisessa sivualtaassa (IR-A) vasemmalla puolella on huomattavissa suuri halkeama (kuva 5). Sivualtaista pinnoite kulunut osittain. Erityisesti suuret kuluneet alueet ovat altaiden ulkoreunoilla (kuva 6).



KUVA 4. Koristeryhmän LR yläreuna.



KUVA 5. Sivuvesiallas IR-A.



KUVA 6. Sivuvesialtaan LR-A reuna.

3.10 Sokkeli

Sokkelin (M) paksuus on noin 600 mm ja sen pinnalla esiintyy paljon halkeamia. Osa niistä on injektoitu edellisen korjauksen yhteydessä (kuva 1) ja niiden kunto on pysynyt staattisessa tilassa korjauksen jälkeen. Sivualtaita yhdistävän syvennyksen pinta on haljennut korjaustöiden huolimatta (kuva 2). Muurin alapuolella on paljon pitkiä, 3-4 mm leveitä halkeamia (kuva 3-6). Rapautumista erityisesti paljon on huomattavissa suihkulähteen eteläpuolella. Monien halkeamien sisällä on huomattavissa orgaanista kasvustoa. Se kiihdyttää betonin rapautumista. Lisäksi betoni lohkeilee halkeamien kohdissa.

Idänpuolella suuren halkeaman kohdalta insinööritoimisto Lauri Mehto Oy otti porausnäytteen 8 (kuva 6). Näyte osoitti, että sokkelin pinnalla on noin 10 mm korjauslastia, jonka karbonatisoitumisaste on matala. Ohuthietutkimusta ei ole tehty.



KUVA 1. Injektoidut halkeamat aukon yläpuolella.



KUVA 2. Syvennyksen vauriot.



KUVA 3. Muuriseinän M halkeama.



KUVA 4. Muuriseinän M lohkeama.



KUVA 5. Muuriseinän M halkeamat.



KUVA 6. Poranäytteen 8 ottopaikka.



KUVA 1. Pilari koriste V1-O.



KUVA 2. Uusittu pilarin koriste V16-O.



KUVA 3. Pilarin V1 yläpuolen halkeamat.



KUVA 4. Pilarin V2 halkeama.

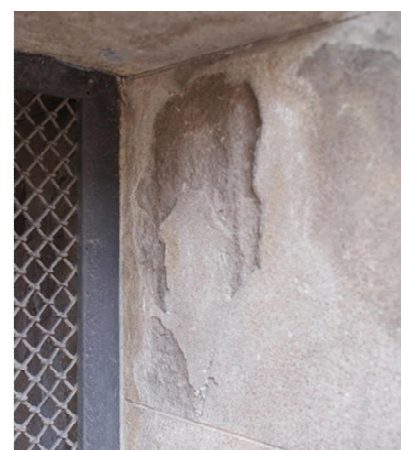
3.11 Betonipilarit

Yhteensä suihkulähteen julkisivussa on 20 betonipilaria. Pilareihin V4, V5, V9, V10, V14, V15, V19 ja V20 kiinnittyvät koristeryhmien veistokset. Muiden pilareiden keskiosassa on ympyrämuotoinen koriste (O). Koristeesta pystyy hahmottamaan leijonan naaman piirteitä. Koristeet ovat rapautuneita. Pilarin V16 koristeosa on vaalettu uudestaan (kuva 2) aikaisemmassa korjauksessa. Betoni on vaaleampaa väristä ja hienorakeisempaa. Uudessa osassa on huomattavissa merkkejä alkalikiviainesreaktiosta.

Monet halkeamat pilareiden yläpäissä on injektoidu aikaisemmassa korjauksessa (kuva 3). Lähes kaikissa pilareissa sivuissa esiintyvät pystysuuntaiset halkeamat (kuva 4) tai niiden korjausjäljet (kuva 5). Pilarissa V2 vasemmalta puolelta on huomattavissa suuri lohkeama (kuva 6)



KUVA 5. Pilarin V16 halkeama.



KUVA 6. Pilarin V2 lohkeama.

3.12 Muut vauriot ja havainnot

Länsipuolella pilareiden V20 ja V2 väliltä aukkojen yläpuolella on 8 pyöreää jälkiä (kuva 1), jotka johtuvat mahdollisesti porausnäytteiden otosta. Betoni vaikutta olevan hienorakeisempaa ja jälkien reunat ovat vaalean värisiä, joka voi viitata kiinnityslastin käyttöön. Yläosan betonipinnalla on huomattavissa vaaleita valumajälkiä, jotka ovat mahdollisesti merkkiä suolavauriosta (kuva 2).

Jokaisen aukon kohdalla on kaksi metallipilaria. Niistä liukenevat aineet aiheuttavat valumajälkiä muurin betonipintaan (kuva 5). Monien pilareiden yläkiinnitys on osittain auki (kuva 3). Lisäksi aukkoja suojaava metataliverkko on rikki kahdessa kohdassa (kuva 4).

Pilarissa V3 oikeasta sivusta on tehty syvennys ja reikä tappilukkoa varten (kuva 6).



KUVA 1. Jälki betonipinnassa.



KUVA 2. Valumajäljet yläosan jalassa J.



KUVA 4. Reikä aukon metalliverkossa.



KUVA 3. Metallipilarin yläpää.

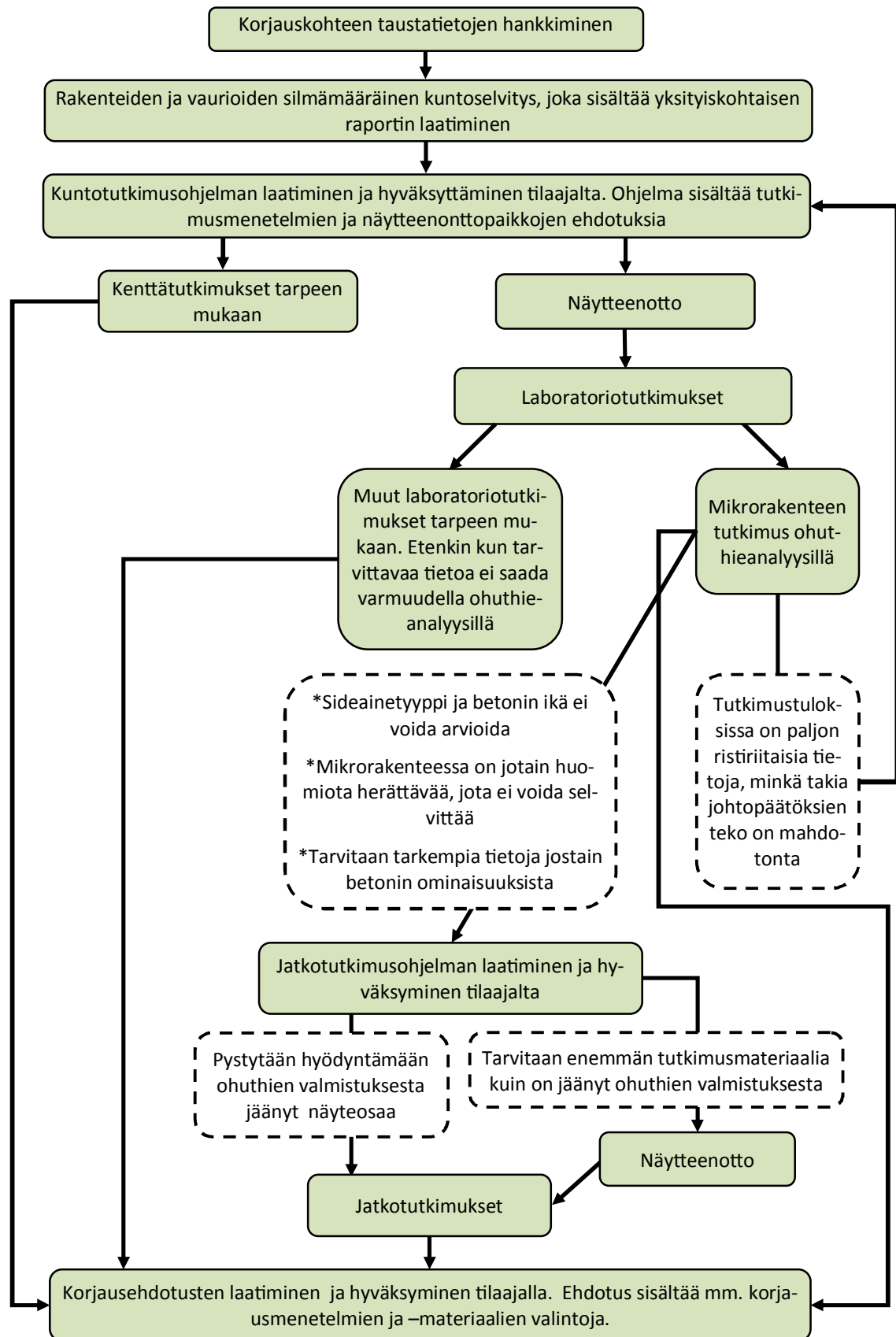


KUVA 5. Valumajäljet aukon kohdalla.



KUVA 6. Tappilukko.

Liite 4. Ennen vuotta 1930 valmistettujen betonirakenteiden kuntotutkimuksen etenemisen suositus



Liite 5. Ennen vuotta 1930 valmistettujen betonirakenteiden korjaussuunnitelman valinnan suositus

