

Historiallisten betonien ominaisuudet ja korjaaminen

Valeryia Pulko

Tekniikan kandidaatti (TkK)
Rakennesuunnitteluharjoittelija,
Pöyry Finland Oy
valeryia.pulko@poyry.com

Tämä artikkeli perustuu Valeryia Pulkon diplomityöhön: *Ennen vuotta 1930 valmistettujen betonien ominaisuudet ja korjausmenetelmät*. Tutkimuksen tilasivat Senaatti-kiinteistöt syksyllä 2018. Toisena hankkeen osapuolena toimi konsulttitoimisto Pöyry Finland Oy. Diplomityössä oli 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.

Betonikehityksen historia ennen vuotta 1930

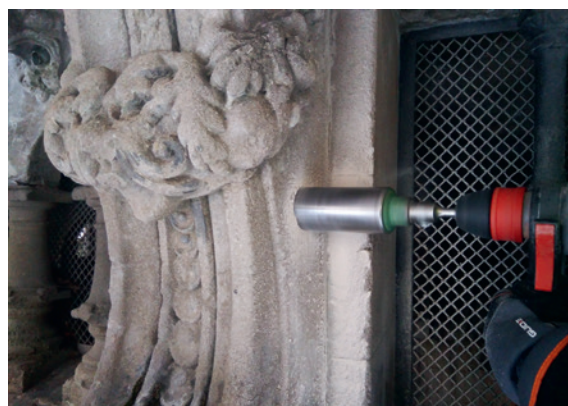
Hydraulisten sideaineiden käytöstä on todisteita jo noin vuodelta 1000 eKr. Foinikiassa. Laajemmin muurauslaastia sideaineena alkoivat käyttää kreikkalaiset noin vuonna 750 eKr. Tästä huolimatta vasta antiikin Roomassa noin vuonna 150 eKr. alettiin käyttää hydraulisia sideaineita betonin valmistukseen. Roomalaista keinotekoista kiveä valmistettiin kalkista ja potsolaani-nimisestä tuliperäisestä hiekasta. Säilyneen tiedon perusteella betonien kehitys oli vähäinen keskiajalla, vasta 1600-luvulla alettiin tietoisesti jäljitellä antiikin Rooman betonia. Vuonna 1796 englantilainen tehtailija James Parker

Ennen vuotta 1930 valmistetut betonirakenteet ovat haastavia korjauskohteita, koska historiallisten betonien ominaisuuksia ei Suomessa tunneta hyvin. Historialliset betonit poikkeavat huomattavasti mikrokoostumukseltaan ja ominaisuuksiltaan nykyajan betoneista. Tästä syystä historiallisia betonikohteita pitää tutkia perusteellisesti ennen korjaustoimenpiteiden päättämistä. Väärin valittu korjausmenetelmä tai korjausbetoni voi aiheuttaa alkuperäisten rakenneosien vaurioitumisen.

valmisti täysin uudenlaista sideainetta savi-pitoisesta kalkkikivestä (noin 25 % savea). Uusi sideaine sai nimensä romanisementti (eng. Roman cement) punertavan värinsä vuoksi. 1800-luvun alussa ranskalainen insinööri Luis Vicat tutki perusteellisesti kalkin kykyä kovettua veden alla. Vuonna 1812 hän pystyi valmistamaan kalkkikiven ja saven seoksesta keinotekoista sideainetta ja nimesi sen hydrauliseksi kalkiksi (eng. hydraulic lime).

Varsinaisen sementin historia voidaan katsoa alkavan portlandsementin keksimisestä. Vuonna 1924 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.¹ Vasta vuonna 1844 Aspdinin sementtiseosta kehitettiin modernin portlandsementin kaltaiseksi. Englantilainen Isaac Johnson poltti seosta noin 1450°C:ssa, jolloin tapahtuu sementin osa-ainesten sintraantumista. Sintrauksen seurauksena portlandsementin lujuus oli huomattavasti suurempi kuin aikaisemmin kehitettyjen seoksien lujuus.

Vuosien 1840–1930 betoniteknologian kehityksen seurauksena betonin ominaisuudet parantuivat merkittävästi, mikä vaikutti betonin yleistymiseen rakennusmateriaalina. Betonin ominaisuuksien parantamiseen vaikuttivat ensisijaisesti sementin poltto- sekä



1–4 Säätytalon suihkulähde oli tutkimuksen kohde. Suihkulähde on rakennettu 1890-luvulla arkkitehdin Gustav Nyströmin suunnitelmilla. Suihkulähde on massiivinen ja koristeellinen betonirakennelma, joka koostuu maanalaisesta kammioista ja maanpäällisestä osasta.



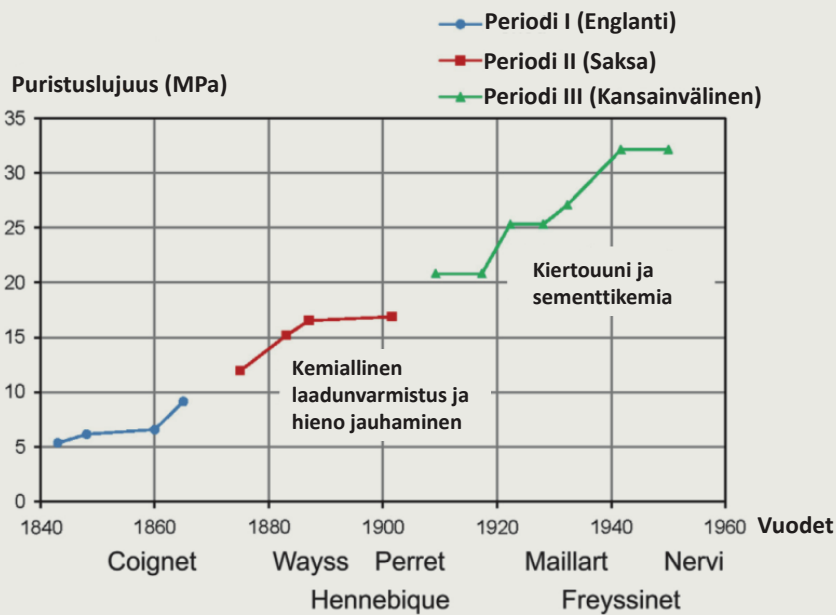
3



1

2

4



5 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).

jauhamisteknologioiden kehitys, betonin suhteituksen kehitys ja betonin valmistusmenetelmien kehitys. Betoniteknologian kehitys ja tiedon kulkeutuminen olivat kuitenkin suhteellisen hidasta. Lisäksi rakentamisen tieto ja taito perustuivat pitkälti kokemuseräiseen osaamiseen. Myös paikallisten raaka-aineiden ominaisuuksilla oli suuri vaikutus betonien ominaisuuksiin. Näin ollen betonissa oli myös huomattavia paikallisia vaihteluita.

Merkittävin syy betonin käytön yleistymiselle oli puristuslujuuden kasvu arvosta 5 MPa arvoon 25 MPa vuosina 1840–1930 (kuva 5). Lujuuden kehitys voidaan jakaa tällä aikavälillä kolmeen periodiin: 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. Verrattuna modernihin betoneihin, joiden lujuus on yleensä 30–60 MPa, historialliset betonit olivat paljon heikompia lujuusominaisuuksiltaan.

Alkuvaiheessa sementtiä valmistettiin perinteisissä kuilu-uuneissa, joita käytettiin jo vuosisatoja aikaisemmin poltetun kalkin valmistukseen. 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 ideoi-

den pohjalta kiertouunin rakennetta. Uusi valmistusmenetelmä mahdollisti sementin laadun parantamisen ja alensi kustannustasoa. Sideaineen valmistusteknologian kehityksen seurauksena kiertouunien käyttö alkoi yleistyä 1900-luvun alussa ensin Amerikassa ja vasta 1910-luvulla Euroopassa.

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.

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. Vasta vuonna 1918 amerikkalainen betonin tutkija *Duff A. Abrams* mullisti rakennusalan teoksella *Design of Concrete Mixtures*, jossa hän osoitti betonikokeiden tulosten avulla vesisementtisuhteen ja betonin puristuslujuuden välisen riippuvuuden.

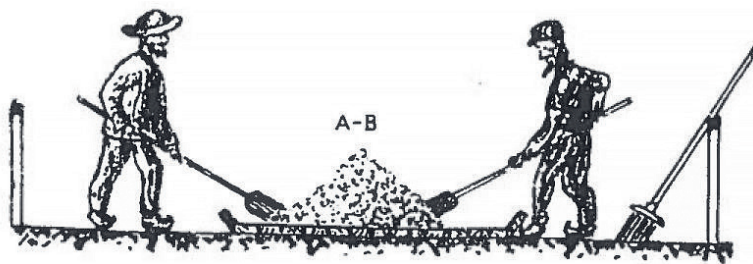
Betonin valmistuksessa alettiin käyttää sekoitus- ja tiivistyskoneita jo 1800-luvun loppupuolella, kuitenkin näiden koneiden laajempi käyttö alkoi vasta 1900-luvun alussa. Sekoitus- ja tiivistyskoneita käytettiin pääosin isoilla työmailla. Pienillä työmailla betonia sekoitettiin ja tiivistettiin käsin vielä 1900-

luvun alussakin. Tämän seurauksena historiallisten betonien laatu vaihteli paljon työmaiden varustetasosta riippuen.

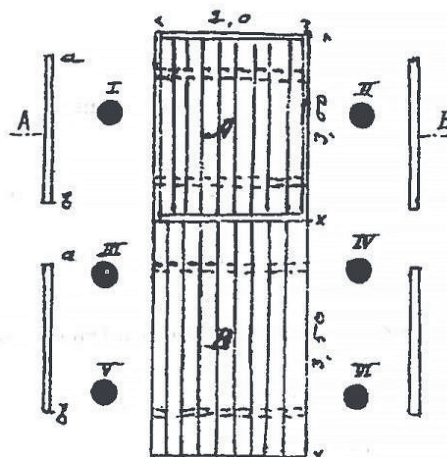
Betonin ominaisuuksien kehittyminen ja erityisesti puristuslujuuden kasvaminen mahdollisti monimutkaisten betonirakenteiden valmistamisen. Betonin heikkojen vetolujuusominaisuuksien parantamiseksi 1800-luvun loppupuolella keksittiin lukuisia rauditusjärjestelmiä. 1800-luvun loppupuolella usein käytettiin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

Betonirakenteiden yleistymisestä johtuen 1800–1900-lukujen vaihteessa alettiin seurata betonien laatua betonirakenteiden turvallisuusriskien vähentämiseksi. Ensimmäistä kertaa systemaattista betonikokekappaleiden puristus- ja vetolujuuden mittaamista käytettiin Saksassa. Maailman ensimmäiset betoninormit julkaistiin vuonna 1877 Preussissa. Muualla Euroopassa normit laadittiin huomattavasti myöhemmin. Vuonna 1904 julkaistiin Britannian ensimmäinen betonistandardi. Rauditusjärjestelmien kehityksestä huolimatta Ranskassa betoninormit tulivat voimaan vuonna 1906. Vuonna 1908 ensimmäiset betoninormit julkaistiin Venäjällä.

6 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 ilman keskeytyksiä. Kastelun jälkeen mullankosteaan seokseen sekoitettiin sepelikivet (Hurme ym. 1991, 12).



7 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 erikokoiset tiivistysnuijat (Weyerstall 1913, 79).



Betonikehityksen historia Suomessa ennen vuotta 1930

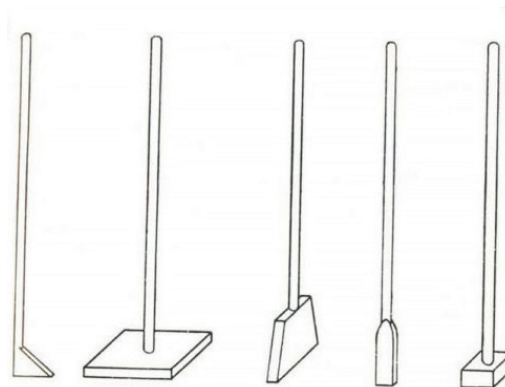
Portlandsementin tuonti Suomeen mainitaan ensimmäistä kertaa vuonna 1856. Toisaalta ensimmäinen betonirakenne Suomessa, Saimaan kanavan muurirakenteet, rakennettiin jo 1850-luvulla ja ne valmistuivat vuonna 1856. Todennäköisimmin sementtiä poltettiin paikan päällä Narvan seudulta tuodusta kalkista ja ruotsalaisesta alunaliuskeesta. 1930-luvulla suoritettut tutkimukset osoittivat, että betonin sideaine oli vanhanaikainen kalkin ja pozzolaanin seos.²

Suomen ensimmäisen sementtitehtaan perustivat vuonna 1869 Saviolle Herman Brummer ja Ernst Qvist. Savion sementtitehtaassa sementin polttoon käytettiin vanhanaikaisia kuilu-uuneja. Savion sementtitehtaan toiminnan alku 1870-luvulla oli varsin vilkasta. Kotimaista portlandsementtiä on käytetty esimerkiksi 1870-luvun alussa rakennetussa Sinebrychoffin olutkellarin eristysmuurauksessa. 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.

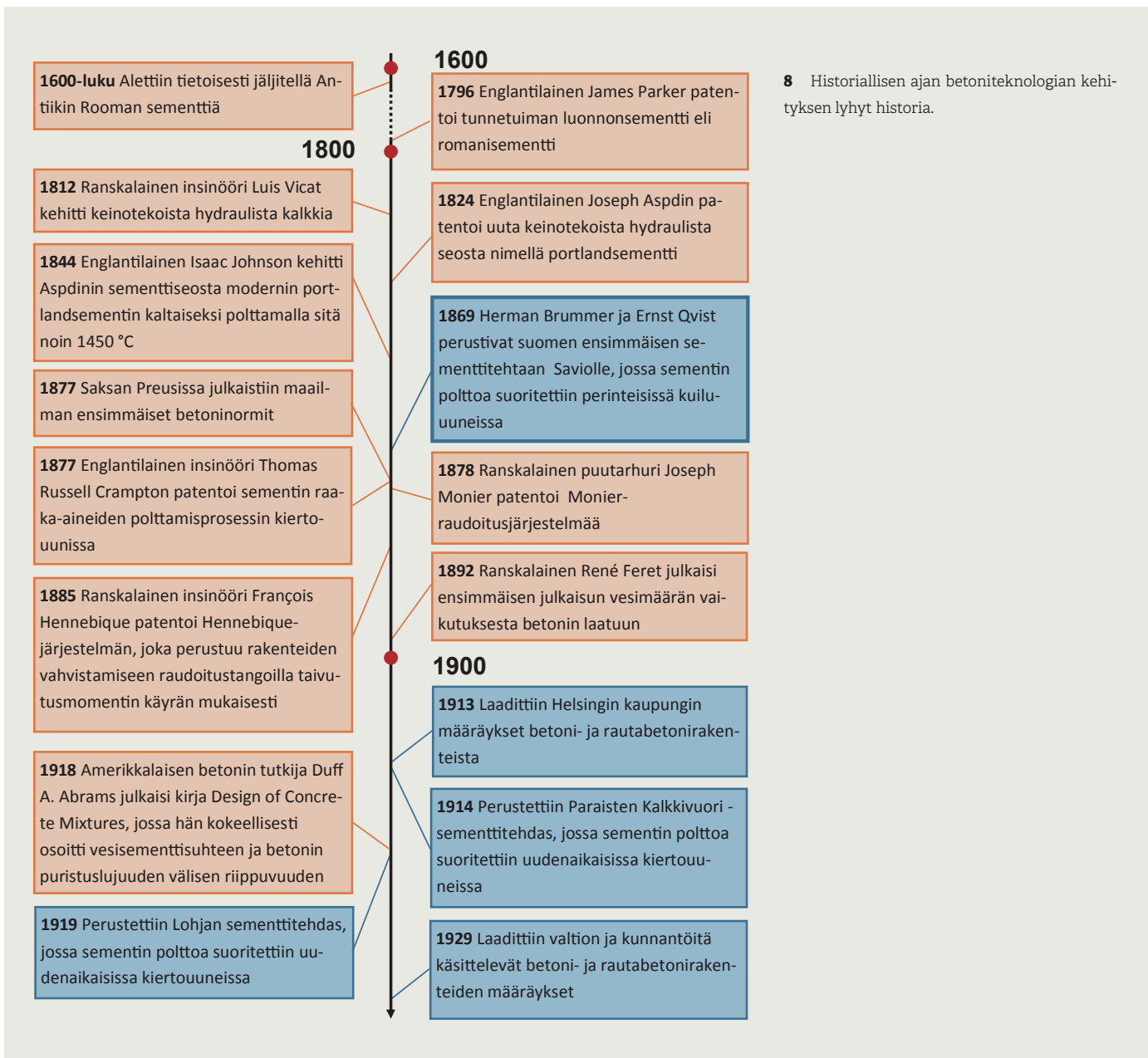
1800-luvun loppupuolella betonia käytettiin Suomessa pääosin perustuksiin, vesirakenteisiin ja esivalmistettuihin elementteihin, kuten viemäriputkiin ja julkisivun koriste-elementteihin. 1800-luvun lopussa syntyi menetelmiä teolliseen betonituotteiden sarjavalmistukseen



7a



7b



8 Historiallisen ajan betoniteknologian kehityksen lyhyt historia.

Suomessa, kuten myös monissa Euroopan maissa. Sementtivalimot valmistivat betonista paljon julkisivun veistoksia, porrasaskelmia, listoja ja lattialaattoja. 1900-luvun alussa alettiin betonista valmistaa sarjatuotannolla myös tavanomaisempia rakennosia, kuten kattotiiliä, betoniputkia, sekä muuri- ja katu-kiviä. Suomessa ensimmäiset betonikoristeet 1880-luvulla olivat tuontituotteita Euroopasta, kuten esimerkiksi Ateneumin pääjulkisivun karyatidi-veistokset. Myöhemmin suurin osa koriste-elementeistä valmistettiin paikallisissa sementtivalimoissa. Esimerkiksi Helsingin sementtivalimo valmisti Johanneksen kirkon julkisivun betoniveistokset vuosina 1888–1891.

Betoniteknologian kehitys aiheutti betonirakentamisen yleistymisen 1900-luvun alussa myös Suomessa. Betonia käytettiin

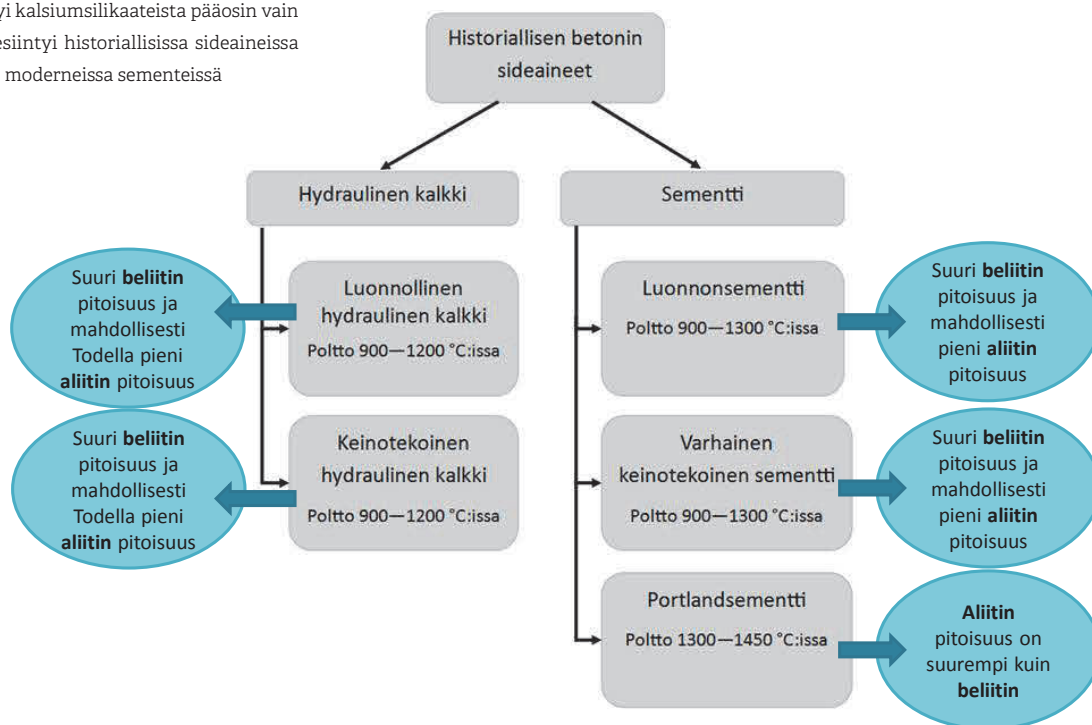
kin Suomessa 1900-luvun alussa pääasiassa moderneissa teollisuus- ja liikerakennuksissa sekä julkisissa rakennuksissa. 1900-luvun alun laajamittaisiin ja rakennustaiteellisesti merkittävään teräsbetonirakenne oli vuosina 1908–1915 rakennettu Helsingin rautatieasema. Myös vuonna 1910 valmistetun Suomen Kansallismuseon rakennuksen välipohjat ja osa holveista valettiin betonista. 1900-luvun alun liikerakentamisen kehityksen huippuna on vuosina 1925–30 rakennettu Stockmannin tavaratalo Helsingin Mannerheimintien varrella.

1900-luvun alussa tapahtuneen teräsbetonirakentamisen nousun myötä, sementin tarve kasvoi huomattavasti. Vuosina 1901–1911 sementin tuonti ulkomailta kasvoi 600 %:lla³. Vasta Paraisten Kalkkivuori-tehtaan avaamisen jälkeen vuonna 1914 oli käytettävissä kotimaista

sementtiä. Vuonna 1919 toinen suomalainen sementtitehdas aloitti sementin valmistuksen Lohjalla. Paraisten ja Lohjan sementtitehtaissa sementtiä poltettiin alusta asti uudenaikaisissa kiertouuneissa.

1900-luvun alussa betonin laatua seurattiin Suomessa pääosin vain isoilla työmailla, kuten Helsingin rautatieaseman työmaalla⁴. Ensimmäiset betonimääräykset, Helsingin kaupungin määräykset betoni- ja rautabetonirakenteista, laadittiin Suomessa vasta vuonna 1913. Määräykset käsittelivät betonirakentamista vain Helsingin alueella. Laajemmat määräykset, Betoni- ja rautabetonirakenteiden määräykset, laati Suomeen vastaperustettu Betoniyhdistys vuonna 1929. Määräykset käsittelivät betonirakentamista koko valtiossa ja ottivat mallia saksalaisista betoninormeista.

9 Historiallisten sideaineiden valmistusteknologioiden johdosta sideaineiden mineralogisessa koostumuksessa esiintyi kalsiumsilikaateista pääosin vain beliitti. Aliittia esiintyi historiallisissa sideaineissa vähemmän kuin moderneissa sementeissä



Historiallisten betonien ominaisuudet

Vuosien 1860–1930 betoniteknologian kehityksen seurauksena betonin ominaisuudet parantuivat merkittävästi, joka vaikutti betonin yleistyminen rakennusmateriaalina. Merkittävin kehitysskaskel oli sideaineiden kehittyminen. Sideaineiden kehityksen lisäksi betonin laadun parantamiseen vaikuttivat merkittävästi betonin suhteituksen kehitys ja betonin valmistusmenetelmien kehitys 1800-luvun loppupuolella ja 1900-luvun alussa.

1800-luvulla ja 1900-luvun alussa betonin valmistuksessa käytettiin monia erilaisia sideaineita, jotka voidaan jakaa kahteen pääalajiin: hydraulinen kalkki ja historiallinen sementti (kuva 9). Hydraulinen kalkki jaetaan luonnolliseksi ja keinotekoiseksi valmistusmenetelmän perustella. Historiallinen sementti sen sijaan voidaan luokitella luonnonsementtiin, varhaiseen keinotekoiseen sementtiin ja historialliseen portlandsementtiin.

Nykyään hydraulisen kalkin ja sementin -termien tarkoista määritelmistä sekä niiden oikeanmukaisesta käytöstä on erilaisia käsityksiä. Syynä siihen on epäselvä raja kahden sideainetyypin välillä. Sideainetyypit eroavat toisistaan niin raaka-aineiden, valmistustapojen kuin mikrorakenteidensakin osalta.

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. Nopea jäähdytys johti hydraulisen kalkin hajoamiseen hienoksi rakeeksi.

Sana luonnollinen viittaa siihen, että raaka-aineena käytetty kalkkikivi sisälsi valmiiksi kaikki tarvittavat oksidit (kalkki, piidioksidi, alumiinioksidi jne.). Siten luonnollinen hydraulinen kalkki heijasti paikallista geologiaa ja samalla luonnollisten hydraulisten kalkkien laatujen välillä oli suurta vaihtelua. Sama asia koskee myös luonnonsementtejä, joiden valmistusteknologiassa oli paljon samankaltaisuuksia luonnollisen hydraulisen kalkin valmistuksen kanssa. Sana keinotekoinen vastaavasti viittaa siihen, että oikea koostumus saavutettiin sekoittamalla eri raaka-aineita. Kyseisellä valmistusmenetelmällä valmistetun sideaineen laatu oli tasaisempi valmistuspaikasta riippumatta.

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. 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, joka oli laajasti käytössä Euroopassa 1900-luvun alkuun asti.

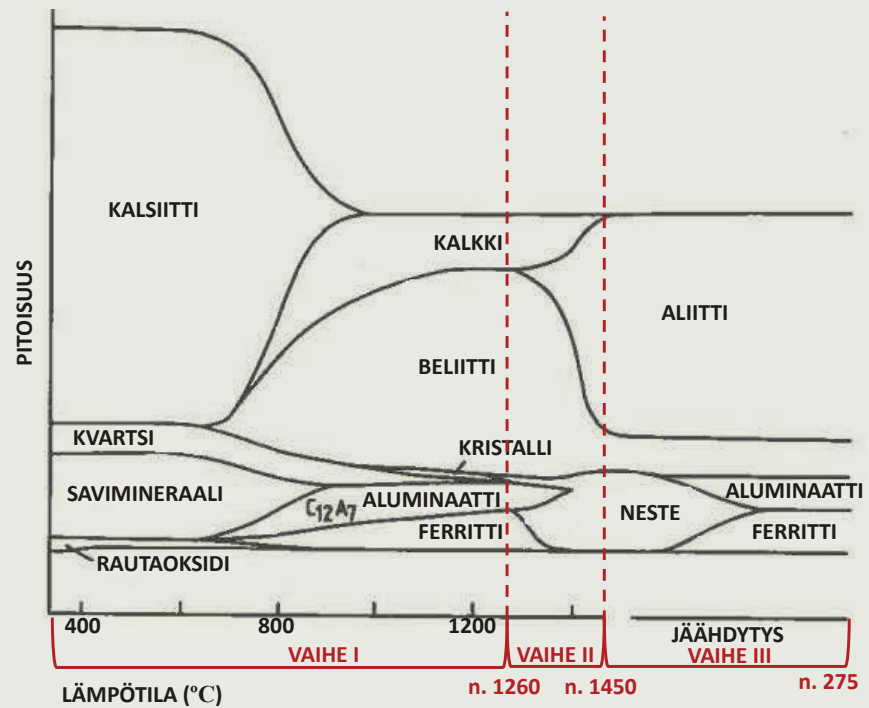
Historiallista portlandsementtiä valmistettiin kalkkikiven, saven ja mahdollisten lisäaineiden (kuten esim. kipsi) sekoituksesta. Portlandsementin valmistus vaati raaka-aineiden polttamista noin 1450 °C:ssa, jossa raaka-aineiden sintraantuminen tapahtuu. Portlandsementtiä suositeltiin käytettäväksi betonin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

Nykyään Euroopassa portlandsementiksi nimitetään, standardin SFS-EN 197-1 mukainen sementtityyppi CEM I. Historiallinen portlandsementti vastaa osittain ominaisuuksiltaan ja valmistusteknologialta modernia sementtiä CEM I. Englanninkielisessä kirjallisuudessa sekaannusten välttämiseksi pitää huomioida, että termiä Portland cement käytetään edelleenkin sementin yleisenä terminä. Suomessa sen sijaan käytetään nykypäivänä termiä sementti.

Varhaista keinotekoisista sementtiä valmistettiin samoista raaka-aineista kuin portlandsementtiäkin, mutta poltonlämpötila oli alle 1300 °C. Varhaisen keinotekoisien 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 keinotekoisista sementtiä.

Merkittävin ero modernissa ja historiallisissa sideaineissa on sideaineen mikrokoostumus, joka johtuu pääosin polttoteknologian

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



eroista (kuva 10). Hydraulisen sideaineen tärkeimmät mineraalit ovat beliitti ja aliitti. Beliitti muodostuu välillä noin 700–1200 °C. Polttolämpötilan noustessa yli 1260 °C osa beliittiä ja kalkkioksidia reagoivat keskenään muodostaen aliittia. Kalsiumsilikaatit reagoivat eri tavoin veden kanssa betonin hydrataatioreaktiossa. Aliitti reagoi nopeasti veden kanssa ja reaktiossa muodostuu paljon kalsiumhydroksidia. Aliittisarja saavuttaa lujuutensa jo 28 päivän iässä. Beliitti reagoi huomattavasti hitaammin kuin aliitti ja kalsiumhydroksidia muodostuu vähemmän. Beliittisarjan lujuuden saaminen kestää vastaavasti noin 90 vuorokautta tai kauemmin⁵.

Aliitin (C_3S) pitoisuus moderneissa sementteissä on noin 60 % ja beliitin (C_2S) pitoisuus noin 10–15 %, kun taas historialliset sideaineet ovat yleensä beliittipitoisia. Tämä johtuu sideaineen polttoteknologian vajaavaisuudesta. Historiallisissa sideaineissa beliitin pitoisuus oli korkea alhaisten polttolämpötilojen johdosta. Korkean beliittipitoisuuden seurauksena historiallisten betonien lujuudenkehitys oli hitaampaa ja lujuus ei saavuttanut vastaava tasoa kuin moderni betoni. Historiallisista sideaineista ainoastaan historiallisessa portlandsementissä aliitin pitoisuudet oli suurempi kuin beliitin pitoisuus. Aliitin pitoisuus oli kuitenkin yleensä alle 60 % polttoteknologian vajaavaisuudesta johtuen. Beliitin pitoisuus historiallisessa portlandsementissä oli vastaavasti paljon yli 15 % ennen vuotta 1930.

Historiallisten betonien lujuudenkehityksen hitauteen vaikutti myös sideaineiden klinkkerin raekoko, joka oli verrattain karkeaa moderniin sementtiin verrattuna. Miten suurempi sideaineen raekoko on, sitä pienempi on reaktiopinta-ala, mikä hidastaa hydrataatioreaktioita sekä pienentää vedentarvetta. Tämän lisäksi suurikokoiset rakeet reagoivat joskus vain pinnasta, minkä johdosta osa sementtipartikkeleista jää betoniin reagoimattomina.

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. Historiallisten sideaineiden klinkkereiden maksimirakekoot olivat muuttuneet vuoden 1879 arvosta 0,6 mm vuoden 1922 arvoon 0,2 mm. Verrattuna modernin portlandsementin klinkkerin raekokoon, joka on keskimäärin 0,02 mm ja maksimissaan 0,09 mm⁶, historiallisten sideaineiden klinkkerien rakekoot olivat huomattavasti suurempia. Historiallisten sideaineiden suuret klinkkerirakekoot johtivat sen ajan jauhusteknologian puutteista.

Historiallisten betonirakenteiden kuntoselvitys ja korjaussuunnittelu

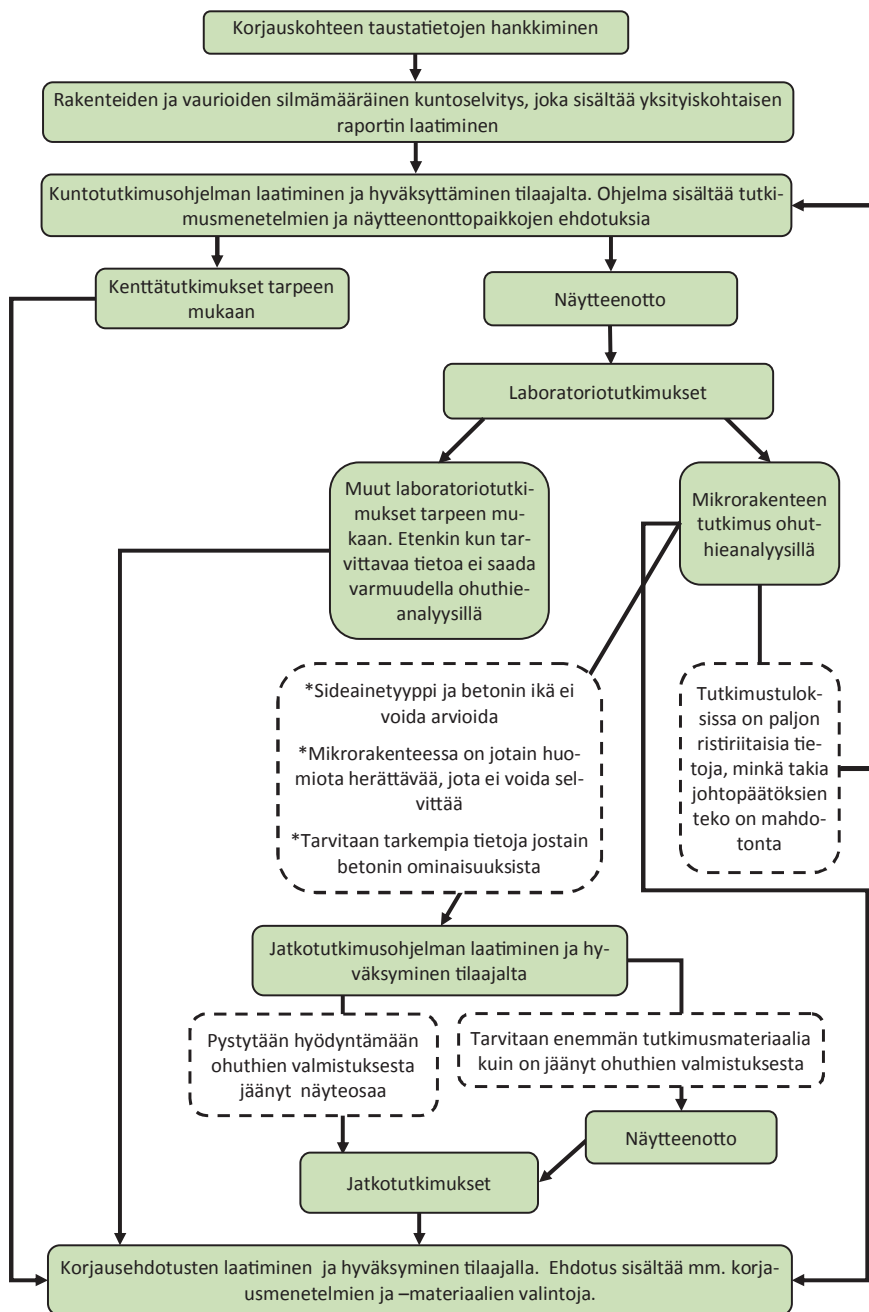
Diplomityön kokeellisessa tutkimuksessa tutkittiin kahden kohteen historiallisten betonien mikrorakennetta ja -koostumusta hyödyntäen optisia ja kemiallisia menetelmiä, sekä röntgensäteilyyn pohjautuvia ja termoanalyttisiä menetelmiä. Kokeellisen tutkimuksen kohteet olivat Säätytalon suihkulähde ja Kansallisar-

kiston balusterikaide. Kokeellisen tutkimuksen aikana tuli esille monia historiallisten betonien tutkimuksiin liittyviä puutteita ja haasteita, jotka voivat johtaa tutkimustulosten vääristymiseen ja virheellisten korjausbetonien valintaan. Merkittävimmät historiallisten betonien tutkimuksen haasteet liittyvät yleensä sideainetyypin riittämättömyyden määrittämiseen, sekä betonin iän arvioinnin vaikeuteen. Lisäksi betoninäyteottopaikkojen sijainnilla on erittäin suuri vaikutus tutkimustuloksiin. Tästä huolimatta näyteottopaikkojen valinta ei ole usein riittävän hyvin pohdittu ja harvoin perustu riittävän laajan silmämääräiseen kuntoselvitykseen.

Ottamalla huomioon kokeellisessa tutkimuksessa esille tulleet puutteet ja haasteet, diplomityössä laadittiin suositus ennen vuotta 1930 valmistettujen betonirakenteiden kuntoselvityksen prosessikaavioksi (kuva 11). Kaavion tarkoitus on ohjata kuntotutkimusta mahdollisimman luetettaviin lopputuloksiin. Suosituksessa pyrittiin tehostamaan historiallisten betonirakenteiden tutkimuksia, parantamaan tutkimustulosten laatua ja vähentämään betoninäytteiden määrää alkuperäisen arvokkaan rakenteen vaurioittamisen vähentämiseksi kansainvälistä standardia SFS-EN 16085 noudattaen. Suosituksessa on korostettu kattavan taustatiedon tärkeyttä ja tarkan silmämääräisen kuntoselvityksen merkitystä korjauskohteen kunnostuksessa.

Historiallisia betoneita suositellaan tutkimaan ensisijaisesti ohuthieanalyysillä, koska

11 Ennen vuotta 1930 valmistettujen betonirakenteiden kuntotutkimuksen etenemisen suositus.

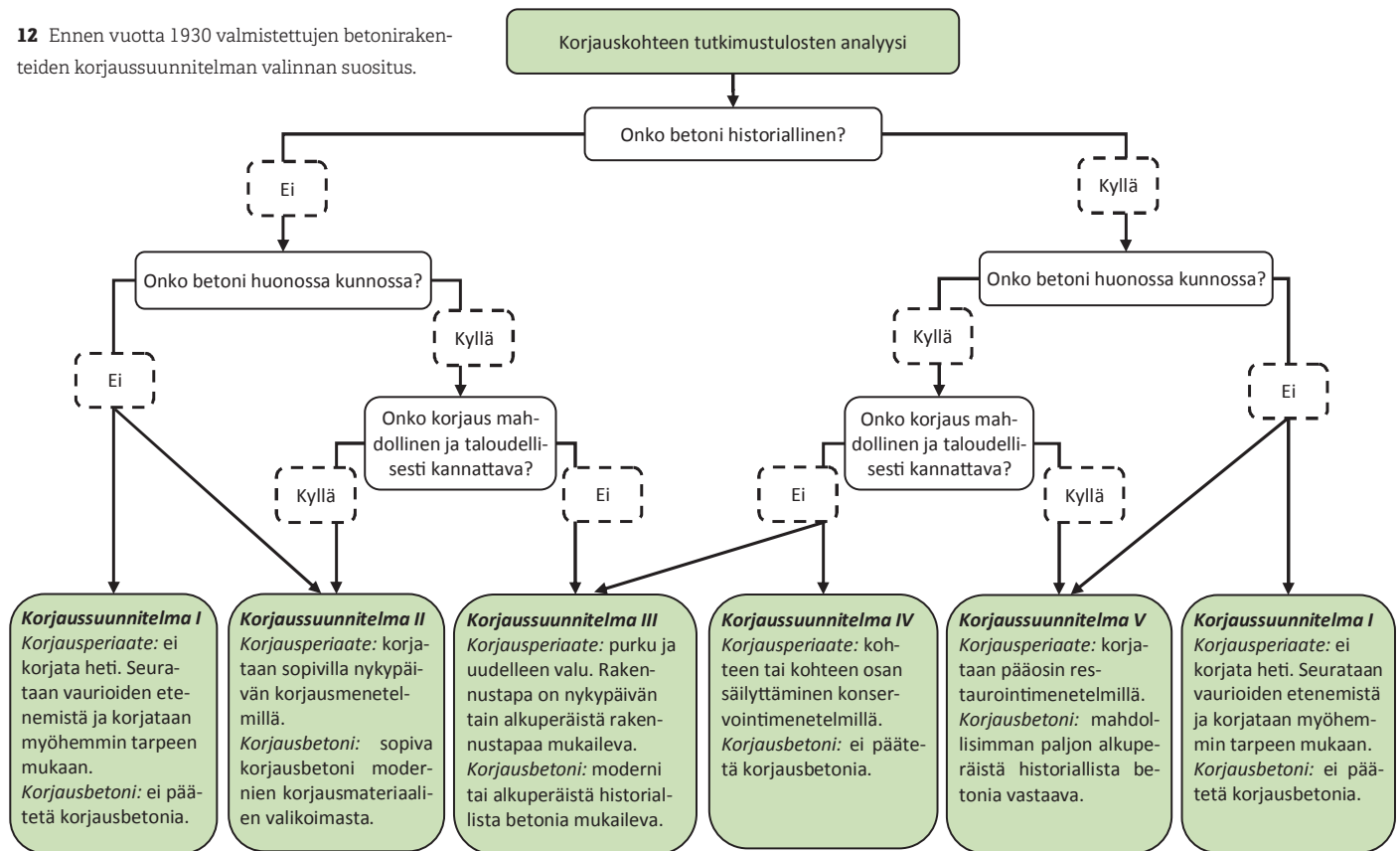


tällä hetkellä ohuthieanalyysi on tehokkain ja yleisin tutkimusmenetelmä betonien mikrorakenteen tutkimiseen. Ohuthieanalyysissa voidaan arvioida tarkasti historiallisten betonien monia ominaisuuksia mikrorakenteen avulla. Historiallisten betonien ohuthieanalyysissa on suositeltava kiinnittää huomiota erityisesti historiallisten betonien sideainetyyppiin ja iän arviointiin. Ohuthieanalyysin päätöksiä on suositeltava perustella ohuthieanalyysin havainnoilla ja/tai mikroskooppikuvilla.

Diplomityön kohteiden betonin ikää yritettiin arvioida myös karbonatisoitumisprosessin etenemisen perustella. Karbonatisoitumissyvyys ei kuitenkaan ole luotettava suure betonin iän arviointiin, sillä betonin iän lisäksi karbonatisoitumissyvyys riippuu monista tekijöistä kuten betonin laadusta ja ympäristöolosuhteista. Karbonatisoitumisen arvioidaan etenevän noin 7–50 mm sadassa vuodessa. Kuitenkin esimerkiksi Suomenlinnan historiallisten betonien tutkimukset osoittavat, että karbonatisoitumissyvyys voi vaihdella muutamista millimetreistä noin 25 millimetriin noin sata vuotta vanhoissa betonirakenteissa.⁷ Sideainetyypin ja lisäainetyypin perustella betonin ikää voidaan arvioida luotettavammin.

Historiallisten betonirakenteiden kohdalla ylimääräisten laboratoriotutkimusten tarve tulee miettiä tarkkaan, jotta porausnäytteiden määrää saadaan pidettyä mahdollisimman pienenä. Mahdollisuuksien mukaan laboratoriotutkimuksia voidaan korvata kenttätutkimuk-

12 Ennen vuotta 1930 valmistettujen betonirakenteiden korjaussuunnitelman valinnan suositus.



silla tai ohuthieanalyysillä, jotka vaurioittavat rakennetta mahdollisimman vähän.

Diplomityön yhteydessä laadittiin myös ennen vuotta 1930 valmistettujen betonirakenteiden korjaussuunnitelman valinnan suositus (kuva 12). Suosituksen tarkoitus on helpota 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 käyttästä ja kulttuurihistoriallinen arvo sekä korjauksen taloudellinen kannattavuus.

Yhteenveto

Historialliset betonit poikkeavat huomattavasti mikrokoostumukseltaan ja ominaisuuksiltaan nykyajan betoneista. Betoneita alettiin kehittää johdonmukaisesti 1800-luvulla. Kehityssuuntia oli monia ja tästä johtuen betoneiden ominaisuudet vaihtelivat paljon. Lisäksi

rakentamisen tieto ja taito perustuivat pitkälti kokemuseräiseen osaamiseen. Näin ollen betonissa oli myös huomattavia paikallisia vaihteluita. Näistä syistä jokainen historiallinen betonirakenne tulee tutkia perusteellisesti ennen korjaustoimenpiteiden päätöstä.

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.

Historiallisten betonirakenteiden perusteellinen kuntoselvitys on ehdoton edellytys kestävä ja taloudellisesti kannattavan korjaussuunnitelman laatimisessa. Historiallisten betonien kuntoselvityksessä tulee erityisesti panostaa tarkan silmämääräisen kuntoselvityksen tekemiseen ja betoninäyteottoa paikkojen määrittämiseen. Nykyään ohuthieanalyysi on tehokkain ja yleisin tutkimusmenetelmä historiallisten betonien ominaisuuksien tutkimi-

seen. Ohuthieanalyysin tutkimusmenetelmiä on kuitenkin suositeltavaa kehittää niin, että ne soveltuisivat tehokkaammin historiallisten betonien tutkimiseen. Erityisesti historiallisten betonien sideainetyyppiin määrittämisen ja betonin iän arvioinnin tutkimusmenetelmiä tulisi kehittää.

Kuvat sivulla 79 Toinen tutkimuskohde oli Kansallisarkiston balusterikaide. Julkisivussa ikkunakentän alaosa on balusterikaide, ikään kuin osoittamassa ikkunan parvekemaisuutta ranskalaiseen tapaan. Asakirjalähteiden mukaan balusterit kaiderakenteineen on valmistettu ns. tampedusta sementistä, betonista.



Lähdeluettelo

- 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. Saattavilla: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00499-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00499-3).
- English heritage. 2012. *Practical building conservation*. Concrete. UK, Farnham: Ashgate Publishing Limited. ISBN 9780754645658.
- 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. Saattavilla: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.017>.
- Hurme, R. ja muut. 1991. *Betoni Suomessa 1860–1960*. Helsinki: Suomen betoniyhdistys ry. ISBN 951-9365-48-6.
- Konov, Tv. 2004. *Historiallisen betonin analyysit ja korjaus*. Historialliset betonit Suomenlinnassa.
- Neuvonen, P., Mäkiö, E. & Malinen, M. 2002. *Kerrostalot 1880–1940*. Helsinki: Rakennustietosäätiö. ISBN 951-682-668-7.
- Taylor, H.F.W. 1997 (1990). *Cement chemistry. 2 edition*. London: Thomas Telford Services Ltd. ISBN 0 7277 2595 0.
- Teknillinen aikakauslehti 1914/5–6
- Weyerstall, O. 1913 (1912). *Sementti, betoni ja rautabetoni: Alkeisoppikirja*. Suomentanut Similä, Y. Helsinki: Kirja.

Viitteet

- 1 English Heritage 2012, 44
- 2 Hurme ym. 1991, 31–32, 114
- 3 Neuvonen, Mäkiö & Malinen 2002, 28
- 4 Teknillinen aikakauslehti 1914/5-6, 109–121
- 5 Brocklebank 2006
- 6 Taylor 1997, 90
- 7 Konow 2004, 18

Properties and repair of historic concretes

Historic concretes differ significantly from the modern concretes especially regarding to the micro structure and mechanical properties. The development of the modern concretes started in the mid-1800s. 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.

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 binders 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. Also, the other raw materials of concrete had more variation as today.

A proper condition survey is prerequisite for cost-efficient and sustainable renovation of historical concrete structure. It is essential to concentrate to the visual inspection and test sampling locations are needed to select carefully not to spoil the structures. 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.

Tiedot työstä, tekijästä, valvoja yms.

Työn nimi: Ennen vuotta 1930 valmistettujen betonien ominaisuudet ja korjausmenetelmät
Tekijä: Valeryia Pulko
Koulutusohjelma: Building Technology, Aalto-yliopiston Insinööritieteiden korkeakoulu
Valvoja: Professori (PoP) Jouni Punkki
Ohjaajat: TkT Esko Sistonen ja DI Aleksi Pöyhönen
Lisätietoa työstä: <https://aaltodoc.aalto.fi>

Valeryia Pulko on alun perin Valko-Venäjältä kotoisin ja hän on asunut Suomessa yli kymmenen vuotta. Hän valmistuu joulukuussa 2019 Aalto-yliopiston Insinööritieteiden korkeakoulusta, rakennustekniikan laitokselta.
Yhteystiedot: valeryia.pulko@poyry.com

