

Ettringiitti ja ohuthietutkimus

Hannu Pyy

tekn.lis., senior adviser
AFRY Finland Oy
hannu.pyy@afry.com

Jokainen, joka on lukenut betonirakenteiden kuntotutkimusraportteja, on törmännyt sanaan ettringiitti ja törmääminen on useimmiten ollut negatiivista, sillä ettringiitti on useimmiten liitetty betonin vaurioitumiseen tai riskiin vaurioitua. Totuus ettringiitistä ja sen merkityksestä ja esiintymisestä betonissa ei kuitenkaan ole näin synkkä, vaan ettringiitillä on oma tärkeä osansa sementin reaktioissa.

Jotta voi ymmärtää ettringiittiä pitää ymmärtää sementti ja sen reaktiot

Portlandsementti koostuu klinkkeristä, jonka komponentit ovat silikaattifaasit aliitti (C3S) ja beliitti (C2S) sekä trikalsiumaluminaatti (C3A) ja ferriitti (C4AF).

Kun klinkkeri jauhetaan hienoksi, siihen lisätään kalsiumsulfaattia (kipsiä) sitoutumisajan säätämiseksi ja seosaineita haluttujen ominaisuuksien aikaansaamiseksi. Näin onkin koossa kaikki, mitä tarvitaan ettringiitin muodostumiseen.

Betonia valmistettaessa sementin C3A reagoisi nopeasti veden kanssa muodostaen aluminaattihydraatteja, mikä johtaisi massan nopeaan sitoutumiseen (jäykistymiseen), ellei sementtiin olisi lisätty kipsiä, jolloin alkuvaiheessa hydratoituvan C3A:n osuus on merkittävästi pienempi ja betoni pysyy työstettävänä tarvittavan ajan.

Kalsiumsulfaatin ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ja C3A:n ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) välisessä reaktiossa muodostuu ettringiittiä: $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{CaSO}_4 + 26\text{--}32\text{H}_2\text{O}$. Plastisessa muodossa olevassa sementtipastassa ettringiitin muodostumisella ei ole merkitystä kovettuneen betonin ominaisuuksiin, kaikki

Ettringiitti on sementin varhainen hydrataatiotuote, jota syntyy ja jota on aina kaikissa portlandsementtiseosaineisissa betoneissa. Tämä tuntuu unohtuvan liian usein ohuthietutkijoilta. Myöskään sitä ei aina tiedosteta, että ettringiitin syntyvaihetta ei ohuthietutkimuksella voi määrittää: taustalla voi myös olla esimerkiksi sulfaatti- tai sulfidikorrosio.

kiteytymät "mahtuvat" plastiseen matriisiin. Toisin sanoen tässä vaiheessa syntyvä primääri ettringiitti on varhainen hydrataatiotuote, jota syntyy ja jota on aina kaikissa portlandsementtiseosaineisissa betoneissa.

Kovettuneessa betonissa oleva primääri ettringiitti on raekooltaan niin pientä, että sitä ei ohuthietutkimuksella voi sementtikiven (sementtipastan) sisältä nähdä. Havaitseminen ja toteaminen vaatii elektronimikroskooppitutkimusta (SEM) tai esim. röntgenanalyysiä (XRD). Yleensä tiivistys- ja suojahuokosissa olevat ettringiittikiteytymät ovat sementtikivestä liuennutta ja uudelleenkiteytyntä alkuvaiheen primääriä ettringiittiä.

Julkisivun kuntotutkimus esimerkkinä

Hyvänä käytännön esimerkkinä toimii eräs julkisivun kuntotutkimus, jossa tehtiin sekä ohuthietutkimuksia, että XRD-analyysjä ettringiitin kartoittamiseksi. Ohuthietutkimuksissa ettringiittiä todettiin julkisivubetonin ilma- ja suojahuokosissa runsaasti etelä- ja länsijulkisivuilla, kun sen sijaan pohjois- ja itäjulkisivuilla ettringiittiä ei huokosissa ollut lainkaan. Hätäinen johtopäätös olisi ollut, että kohteessa on käynnissä "vakava ettringiittireaktio", perustuen kiteytymiin huokosissa.

Itse asiassa kyseessä oli tavanomainen sääräsituksen aiheuttama kastumisesta ja kuivumisesta johtuva pumppausliike, jonka seurauksena ettringiittiä kulkeutuu sementtikiven sisältä huokosiin. XRD-analyysi osoitti, että betonin ettringiittipitoisuus on tavanomainen ja yhtä suuri kaikilla julkisivuilla.

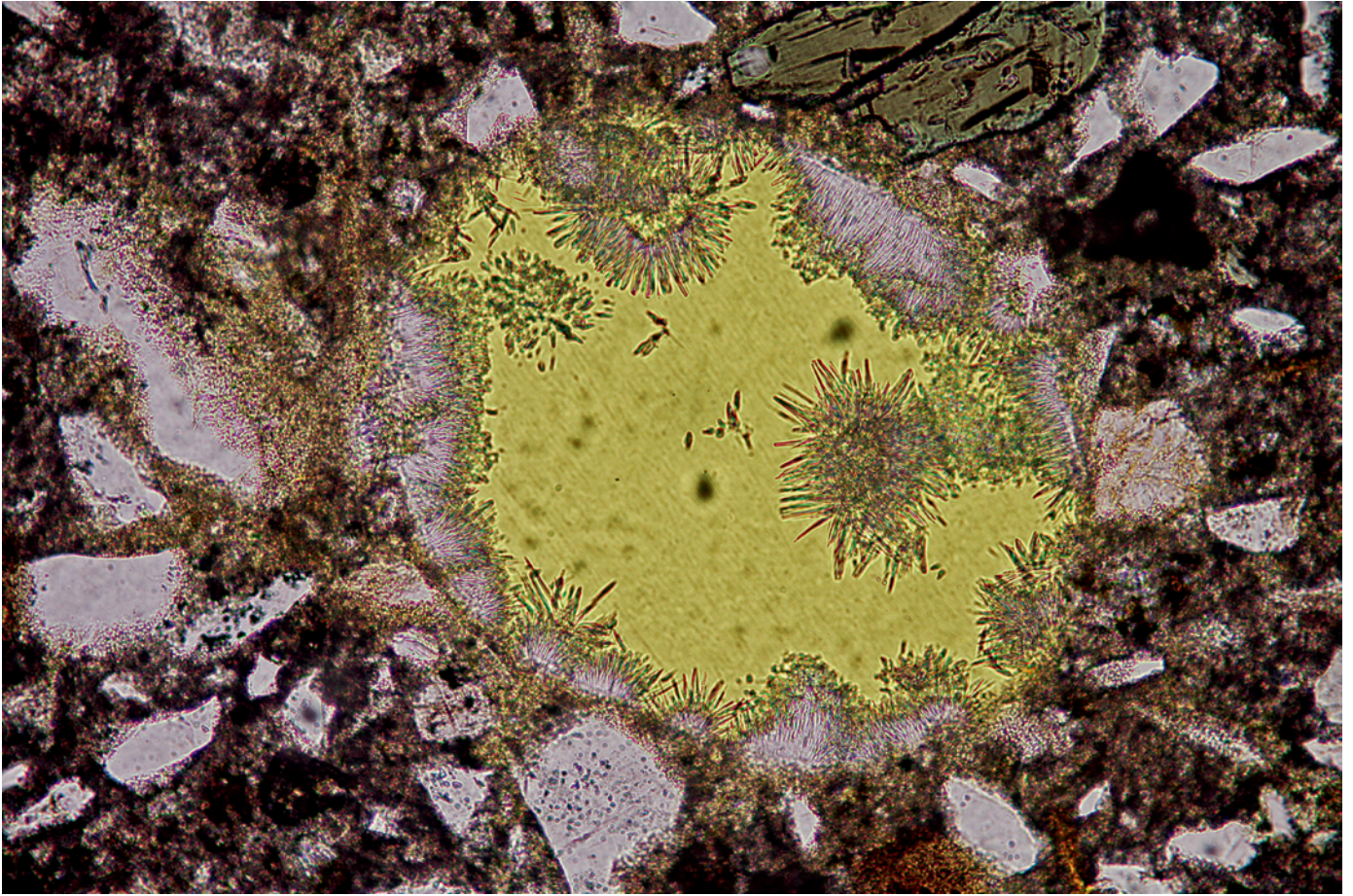
AFRY - Corner

Betoni -lehden uusi asiantuntijapalsta on toteutettu yhteistyössä AFRYn kanssa.

AFRY-Corner lanseerattiin Betoni-lehden 1-26 numerossa. Palaute on ollut positiivista, eli palsta jatkokoon. Lupailin 1. numerossa palata yhteen lempiaiheistani, eli kuntotutkimuksiin. Betoni-lehdessä fokus on tietenkin betonirakenteiden kuntotutkimuksissa, joita on perinteisesti tehty eniten ulkobetonirakenteisiin. Tutkimuskausi on päässyt jälleen lumien sulettua vauhtiin, joten ajankohtaisessa aiheessa ollaan jälleen tulipalopakkasten ja tulipalovahinkojen jälkeen.

Suomen sääolosuhteissa maassa, vedessä ja ilmassa olevat betonirakenteet ovat monitahoisesti kovilla ja ilmastomuutoksen myötä tilanteen oletetaan vain pahentuvan.

Kylmiä rakenteita löytyy mm. silloista ja muista Väyläviraston rakenteista sekä vesihuollon rakenteista, kuten vesitorneista ja



1 Omamuotoisia neulasmaisia ettringiittikiteitä betonin ilmahuokosessa.

muista säiliöistä. Väyläviraston toiminta on monella tapaa järjestelmällisyyden perikuva, mutta vesihuollon puolella tilanne saattaa olla lähes päinvastainen. Paljon on 1960-luvulta originaalikkunnossa olevia rakenteita, joita ei ole koskaan tutkittu. Ei liene yllätys, että huonokuntoisia rakenteita löytyy usein.

Osaavilla kuntotutkimuksilla voidaan ohjata toimintaa paljon, koska toimijoita on äärellinen määrä. Vesirakenteiden tutkimuksen sisällä tieto kulkee kiitettävästi, eikä tutkimuksiin kelpuuteta ketä tahansa toimijaa.

Talopuolella tilanne on heikompi, vaikka Betoniyhdistyksellä on pitkään ollut selkeät tutkijan ja tilaajan ohjeet mm. julkisivujen kuntotutkimuksista. Lisäksi FISE on pitkään pitänyt rekisteriä kuntotutkijoista.

Esimerkiksi taloyhtiöt eivät välttämättä tunnu tietävän tai välittävän kuntotutkimusohjeista ja -pätevyyksistä. Tosin niistä tutkimuskilpailutusten hintavertailujen perusteella laistaa osa tutkimusyrityksistäkin. Julkisivuremonteissa puhutaan usein sadoista tuhansista euroista, ja vaarana on, että puutteellisin tiedoin tehty remontti epäonnistuu ja rahaa palaa lisää korjausten korjaamiseen ja pahimmassa tapauksessa vielä riitelyynkin.

Tällaisten tilanteiden taustalla on usein puutteelliset ja jopa virheelliset kuntotutki-

mukset. Ensin säästetään tutkimusten teettämisessä, jolloin moni vaurioasia saattaa jäädä huomaamatta. Puutteellinen tutkimusraportti voi johtaa ylikorjaamiseen, jos suunnittelija ylivarovaisuudessaan suunnittelee kaikki uusiksi, vaikka ei olisi tarpeen. Liikakustannusten lisäksi turhia ja väärä korjauksia tulisi välttää jo luonnonvarojen säästämiseksi. Turha materiaalin käyttö tai uusiminen ei täytä kestävän kiertotalouden kriteereitä.

Edellä kirjoittamalla yritän kannustaa järkevään toimintaan. Osaamista niin kuntotutkimus- kuin laboratoriopuolelta Suomesta löytyy, kunhan ei säästetä väärässä paikassa. Perinteisten kuntotutkimusten lisäksi tutkimista tarvitaan entistä enemmän, kun kiertotaloustoimet lisääntyvät. Eikä tule myöskään unohtaa haastavia sisätilarakenteita, kuten uimahalleja tai teollisuuskohteita, joiden sisältötilarakenteiden kuntotutkiminen ei ole samoin säärajoitteista kuin ulkobetonirakenteiden. Laadukasta ja osaavaa tutkimista tarvitaan laajalti!

Tässä lehdessä laatimamme ammatillisen artikkelin kirjoittajana on betonitutkimusten kehittäjä ja konkari *Hannu Pyy*. Hän on pitkään tutkinut betonia lukuisissa vaativissa hankkeissa niin paikan päällä kuin mikroskoopin objektiivin läpi laboratorioissa. Hannu aloitti ohutietutkimukset Suomessa jo 1980-luvulla.

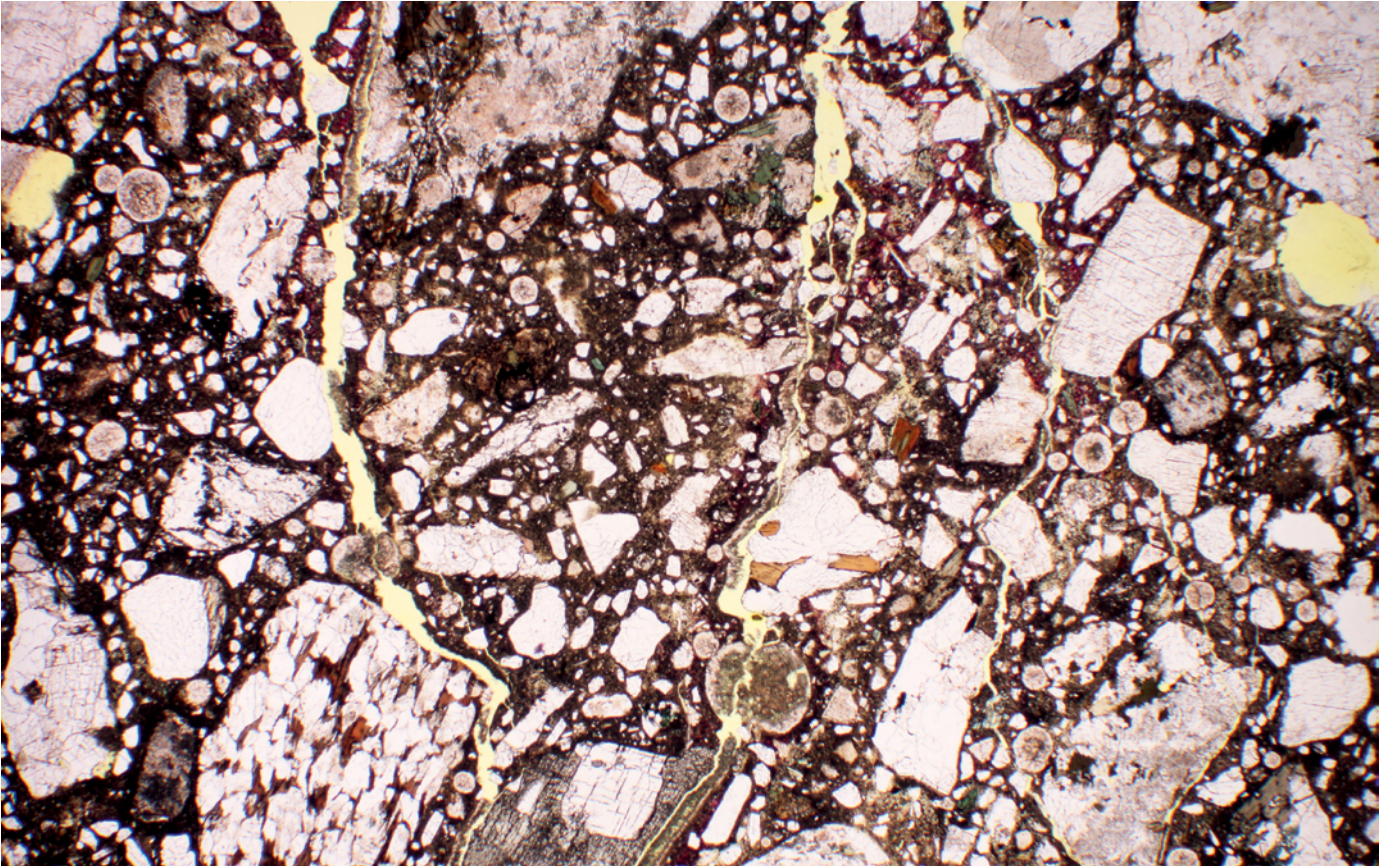
Oheisessa artikkelissa Hannu kirjoittaa kuntotutkimuksissa tehdyistä ettringiittihaannoista ja miten kyseisiä löydöksiä tulisi tulkita. Pelkkä havainto ei ole lopputulema, vaan osaamista ja ilmiöiden ymmärtämistä tarvitaan, jotta tiedetään miten tulee toimia, jos on tarvetta. Vaurioitumisen ja sen merkityksen arvioimiseksi täytyy vauriomekanismien lisäksi tuntea rakenteiden toiminta, rakennusajankohdan valmistusmenetelmät ja käytetyt materiaalit sekä vuosikymmenten aikana mahdollisesti tehdyt ja käytetyt korjaustavat. Laboratoriotutkimusten tulkinta ja yhdistäminen kokonaisuuteen on tärkeä osa tutkimisessa, koska kuntotutkimuksissa ei voida soveltaa yksiselitteisesti raja-arvona jotain tuloksena saatua lukua tai lukemaa, kuten esimerkiksi asbestitutkimuksessa (on/ei).

Kesää odotellen – uutta tietoa betonista ja lukuelämyksiä toivottaen.



Sami Niemi

Kehityspäällikkö
AFRY Finland Oy
Rakennusfysiikka ja erikoisiasiantuntijapalvelut
sami.niemi@afry.com



2

Muutakin, kuin primääriä ettringiittiä

Tämän "tavanomaisen" ettringiitin lisäksi betonissa voi esiintyä ns. myöhäisen ettringiittireaktion synnyttämää ettringiittiä (engl. delayed ettringite formation, DEF). Ilmiön syynä on yleensä liian voimakas lämpökäsittely elementtitehtaalla tai paikallavalun liian korkeaksi noussut lämpötila betonin kovettumisvaiheen aikana. Näissä tapauksissa sementin reaktio häiriintyy ja se johtaa myöhempään ettringiittireaktioon. Ilmiö vaatii, että betonin lämpötila on yli 60...70 °C esimerkiksi lämpökäsittelyn tai hydrataation seurauksena. Alle tämän lämpötilan ei ilmiötä tapahdu.

Voimakkaita lämpökäsittelyjä oli erityisesti 1970-luvulla elementtien valmistuksessa. Nykyisin riski on lähinnä massiivivaluissa. Kiteytyneen ettringiitin tilavuuden kasvu voi olla 130–140 % lähtöaineiden tilavuuteen verrattuna ja se voi aiheuttaa paisuntaa, halkeilua ja lujuuden heikkenemistä. Lisäksi huokosiin kiteytyvä ettringiitti voi muuttaa (heikentää) suojahuokostetun betonin pakkasenkestävyyttä.

Sitä, onko huokosten ja halkeamien ettringiittikiteytymissä kyseessä myöhäisessä ettringiittireaktiossa syntynyt kiteytymä vai kosteusrasitetusta betonista liennut ja uudelleen kiteytynyt hydrataation alussa syntynyt primääri ettringiitti, ei voi ratkaista ohuthietutkimuksella, vaan se edellyttää muita tutkimuksia ja rakenteessa olevan betonin historiaseelvitystä.

Sulfaatti- ja sulfidikorrosio

Betoniin tunkeutuneet sulfaattit reagoivat sementin reaktiossa syntyneen portlandiitin (Ca(OH)₂) kanssa, muodostaen kipsiä. Sulfaatti-ionit jatkavat reagointia muodostuneen kipsin ja kalsiumalumiinaattihydraatin, monosulfaatin tai hydratoitumattoman C3A:n kanssa muodostaen ettringiittiä. Reaktiossa muodostuneen ettringiitin tilavuus on merkittävästi suurempi verrattuna reaktion lähtöaineisiin ja seuraukset voivat olla samankaltaisia kuin myöhäisessä ettringiittireaktiossa aiheuttaen betonin vaurioitumista paisumisen ja lujuuden menetyksen kautta.

Korroosioriski riippuu lukuisista betonin koostumus- ja tiiveysominaisuuksista sekä sulfaattityypistä ja sulfaattirasituksen muodoista.

Sulfidimineraalit voivat hapen ja betonin alkalisten huokosliuosten vaikutuksesta hapettua rautahydroksidiksi ja sulfaateiksi. Reaktioketjussa syntyy alkali- ja kalsiumsulfaatteja (ettringiittiä) sekä rautahydroksidia. Rautahydroksidi puolestaan voi aiheuttaa ruostealuniamia betonin pintaan. Standardi SFS-EN 12620 +A1 Betonikiviainekset rajoittaa kokonaisrikin määrää kiviaineksessa.

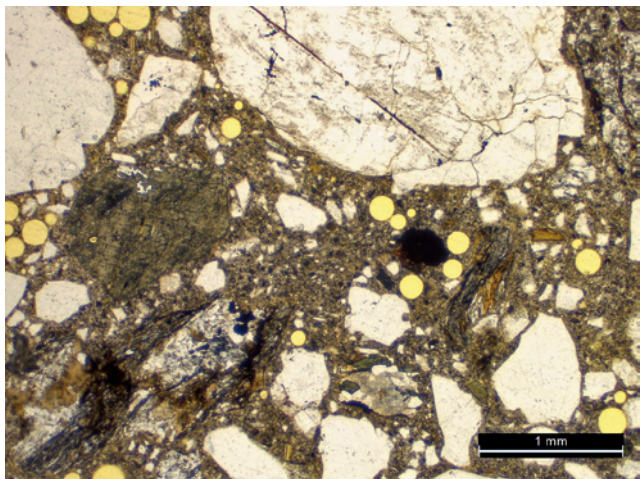
Reaktiot muistuttavat alkali-kivianesreaktiota siinä, että mekanismit ovat käytännössä monimutkaisia, samoin kuin reaktioon vaadittavat olosuhteet ja pitoisuudet

Ohuthietutkimustulosten ymmärtäminen ja sudenkuopat

Koska ohuthietutkimus on kvalitatiivinen analyysimenetelmä edellyttää se tutkijalta hyvää perehtyneisyyttä ja paitsi oman tutkimusalan, niin myös betoniteknikan tuntemusta siten, että ymmärtää ohuthietulosten merkityksen laajemmassa kontekstissa ja sitä, että puhuvatko ohuthietutkija, kuntotutkija ja korjaussuunnittelija samaa kieltä ja ymmärtävätkö he toisiaan – eivät välttämättä. Syntyy mahdollisesti "rikkinäinen puhelin", jossa analyysitulokset ketjussa muuttuvat.

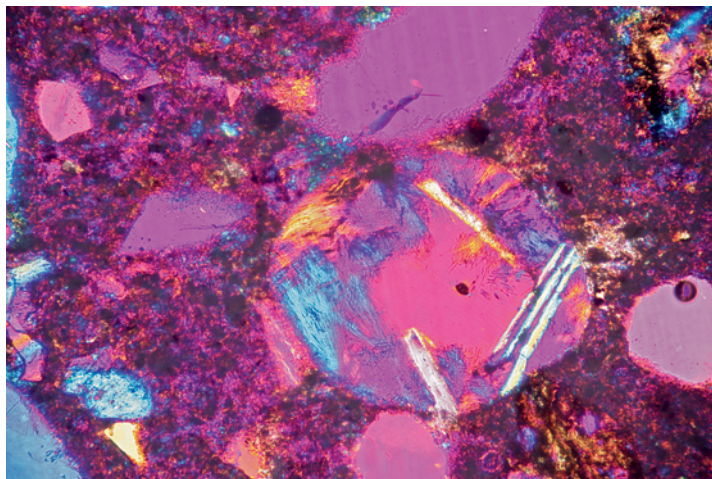
Ohuthietutkija tekee kvalitatiivista analyysiä, jonka tuloksena ei saada tiettyä lukuarvoa kuvaamaan analyysitulosta, vaan tutkija määrittää ettringiitin määrän sanallisesti esimerkiksi raportoimalla, että: ettringiittiä ei ole / on vähän / on paljon / lähes kaikki huokokset ovat täynnä, tai että halkeamat ja huokokset ovat monin paikoin täynnä ettringiittiä, jne. Tai vielä täydentämällä, että betonissa on käynnissä ettringiittireaktio. Näistä viimeiseen tutkijalla tuskin edes on perusteita esittää, ellei mahdollisuutta ole myös muilla keinoin kartoitettu.

Kuntotutkija tekee omat johtopäätöksensä ettringiitin merkityksen osalta ohuthieraportin pohjalta. Jotta asia tulisi varmistettua ja ettringiitin merkitys huomioitua, kuntotutkija voi vielä hieman korostaa asiaa ja ohuthieraportista löytyä lause: "huokosissa on jonkin verran ettringiittiä ja osa pienimmistä huo-



3

2 Runsaasti ja tasaisesti suojahuokostettua betonia, jossa kuvan alalla on 42 suojahuokosta, joista 41 on täynnä ettringiittiä ja sen vuoksi erottuvat vain huokosen pyöreän muodon perusteella. Kuvan oikeassa yläkulmassa on yksi keltaisena näkyvä huokonen, jossa ei ole ettringiittiä. Betonissa on voimakas pakkasvaurio. Kuvassa näkyy kolme pystysuuntaista murtoviiva, jotka ovat pakkashalkeamia.



4

3 Suojahuokostettua betonia, jossa ettringiittiä on normaalisti, mutta se ei ole uudelleen kiteytynyt huokosiin, vaan on sementtipastassa.

4 Ettringiittiä ja portlandiittiä kiteytyneenä kosteusrasitetun betonin ilmahuokoseen.

5 Ohuthie on betonista valmistettu noin 0,025 mm paksu lasilevyllä liimattu leike, jonka päälle on vielä liimattu ohut peitinlasi suojaamaan näytettä. Ohuthienäytteet tutkitaan polarisaatio- ja fluoresenssimikroskoopilla.



5

Ettringite research in concrete

Ettringite is an early hydration product of cement that is always present in all Portland cement concretes, and this seems to be too often forgotten by thin-section researchers.

So, what can we conclude with certainty from the observations of ettringite in thin-section samples?

The presence of crystallizations in the pores indicates repeated moisture stress on the concrete, as a result of which the ettringite of the cement stone has at least partially dissolved and recrystallized in the voids.

The amount of crystallization in the voids also influences the frost resistance of concrete. If most of the voids of well air-entrained concrete are full of crystallizations, in moisture-stressed concrete the crystallizations can often be partly ettringite and partly portlandite, the pore structure has changed, and the concrete's frost resistance may have weakened.

However, the answer to the question of whether ettringite detected in the thin section study is from early hydration, a result of late ettringite formation (DEF), or whether sulphate or sulfide corrosion is in the background, requires other studies and investigations.

kosista on täynnä ettringiittiä" muuttuu kuntotutkimusraportin yhteenvedossa muotoon: "huokosiin on kiteytynyt laajalti ettringiittiä ja betonissa on käynnissä ettringiittireaktio". Näin kuntotukija voi olla "varmalla puolella" ettringiitin merkityksestä. Ja viimein korjaussuunnittelija saattaa pohtia kannattaako koko rakennetta enää korjata, koska siellä on vakava ettringiittivaurio!

Edellä kuvattua keskinäisen ymmärryksen ongelmaa ja kokonaisuuden ymmärtämistä kuvaa esimerkki julkisivututkimuksesta, jossa lähtökohtana oli julkisivupinnassa todettu verkkohalkeilu. Kohteeseen tehtiin kuntotutkimus ja osana sitä ohuthietutkimus. Ohuthieraportissa todettiin, että "huokostäytteitä esiintyy kohtalaisen yleisesti, mutta pääosin vähän. Pienimmät huokokset ovat kuitenkin paikoitellen jo täyttyneet kokonaan, mikä todennäköisesti heikentää pakkasenkestävyyttä. Kokonaisuutena arvioituna tutkituissa näytteissä ei ole havaittavissa erityisen merkittäviä betonin laatu puutteita". Kohteen tutkimuksista kirjoitetussa lausunnossa asia oli muuttunut muotoon: "raportin perusteella on syytä epäillä, että betonia on lämmitetty liikaa valmistusprosessin aikana, josta osoituksena havaitut ettringiittitäytteen huokosissa."

Lausunto siis viittasi myöhäiseen ettringiittireaktioon ilman muuta perustetta, kuin että betonin huokosissa on ettringiittiä, jota siis luonnostaan on kaikissa portlandsementti-

betoneissa.

Kohteeseen tehtiin täydentävä kuntotutkimus ohuthieanalyysineen ja niiden pohjalta voitiin todeta, että julkisivupinnan verkkohalkeilu johtuu betonin suuresta sementti- / sementtipastamäärästä (sementtiä yli 500 kg/m³) ja kuivumisen synnyttämästä verkkohalkeilusta. Ettringiittiä todettiin pieniä määriä huokosissa. Voimakkaasta lämpökäsittelystä ei ollut kyse.

Mitä ohuthietutkimuksella sitten voidaan varmuudella päätellä ettringiittihavaintojen pohjalta?

Kiteytymien esiintyminen huokosissa osoittaa betoniin kohdistuneen toistuvan kosteusrasituksen, jonka seurauksena sementtikiven ettringiitti on ainakin osittain liennuttu ja uudelleen kiteytynyt huokosiin. Kiteytymien määrällä huokosissa on myös vaikutus betonin pakkasenkestävyyteen. Jos hyvin huokostetun betonin suojahuokosista suurin osa on täynnä kiteytymiä, kosteusrasitetussa betonissa kiteytymät voivat usein olla osittain ettringiittiä ja osittain portlandiittiä, on suojahuokosrakenteen muuttunut ja betonin pakkasenkestävyys mahdollisesti heikentynyt.

Sen sijaan vastaus kysymykseen onko ohuthietutkimuksessa havaittu ettringiitti primääriä, myöhäisen ettringiittireaktion seurausta, vai onko taustalla sulfaatti- tai sulfidikorrosio edellyttää myös muita tutkimuksia ja selvityksiä. •