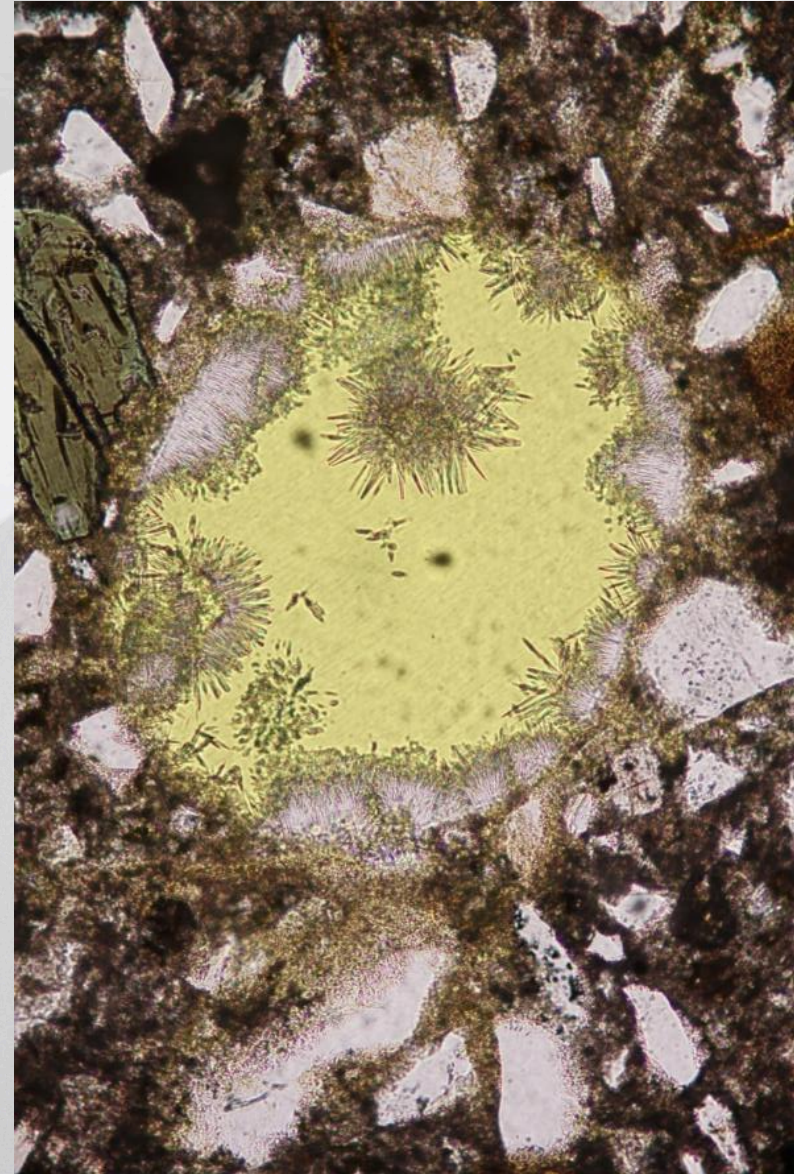


# Kuntotutkimukset ja ettringiitti

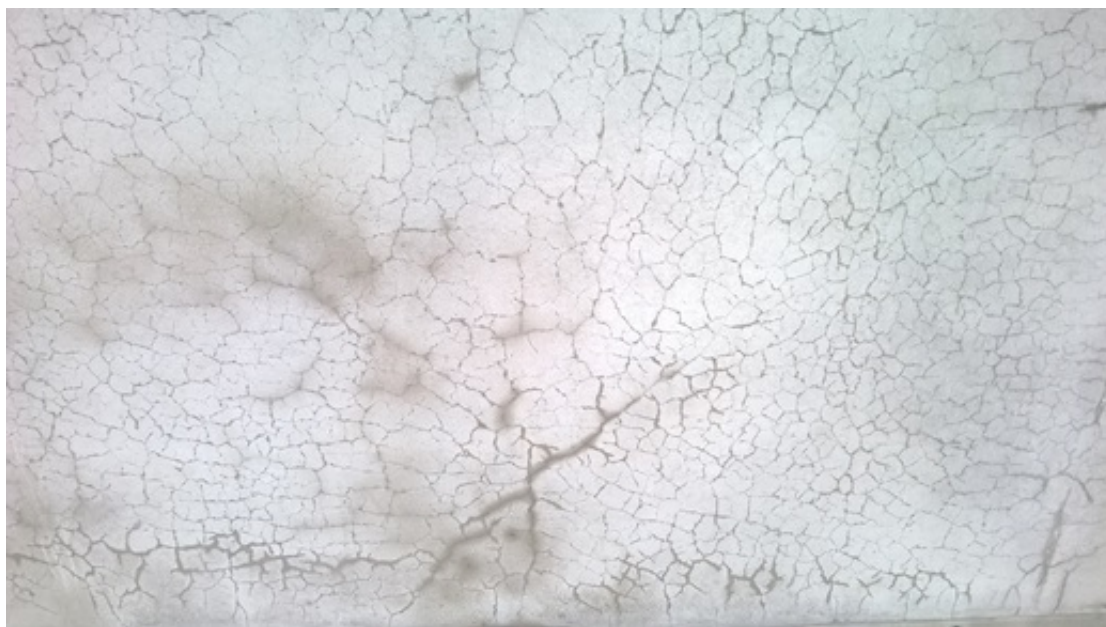
HANNU PYY  
TKL, SENIOR ADVISER

AFRY BUILDINGS FINLAND OY



# Johdanto

Ilmeinen ongelma betonirakenteessa > mitä tehdään > kuntotutkimus



# Johdanto

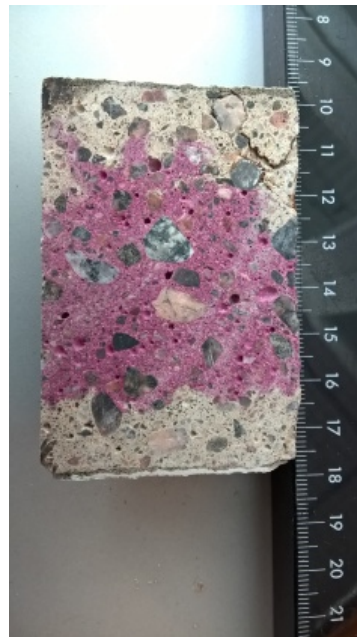
näytteet laboratorioon > analyysit.....



- Puristuslujuus
- Vetolujuus
- Karbonatisoituminen
- Ohuthietutkimus
- Kloridipitoisuus
- Huokosjakoanalyysi
- Sulfaattianalyysi
- Muut analyysit

# Johdanto

näytteet laboratorioon > analyysit > kvantitatiiviset ja kvalitatiiviset analyysitulokset

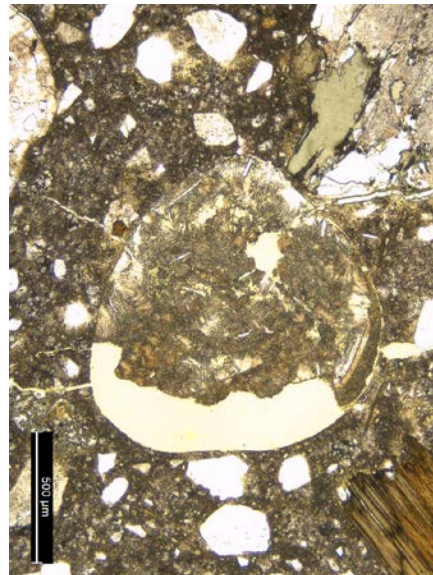
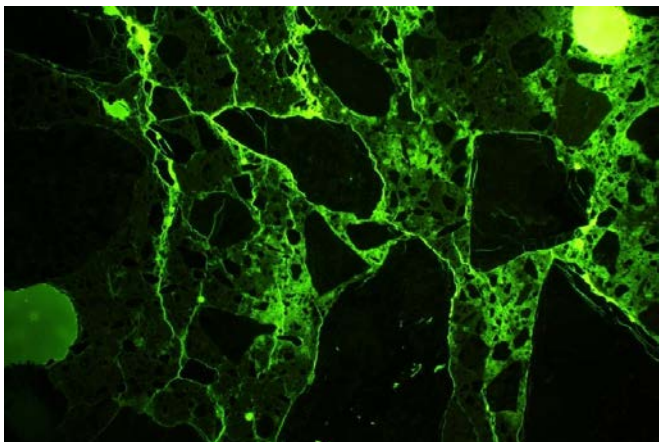
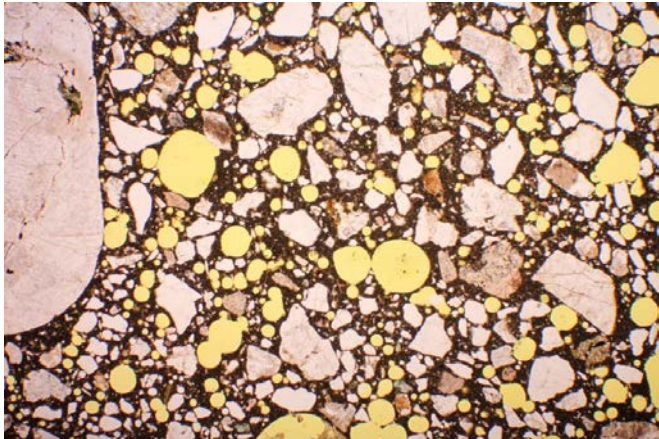


- Puristuslujuus
- Vetolujuus
- Karbonatisoituminen
- Ohuthietutkimus
- Kloridipitoisuus
- Huokosjakoanalyysi
- Sulfaattianalyysi
- Muut analyysit



# Johdanto

ohutietutkimukset > tulosten merkitys kohteen kuntotutkimuksen kokonaisuuteen



- Suojahuokostus
- Ei suojahuokostusta
- Pakkasvauriot
- AKR
- Kiteytymiä huokosissa, **ettringiitti**, portlandiitti
- Muovi- / teräskuituja
- Side- ja seoseosaineet
- Yllättäviä löydöksiä

TULOSTEN YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

# Ettringiitti

Jotta voi ymmärtää ettringiittiä pitää ymmärtää sementti ja sen reaktiot

## Portlandsementin koostumus

- Klinkkeri:
- C3S: aliitti ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ );
- C2S: beliitti ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ );
- C3A: trikalsiumaluminaatti ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ )
- C4AF: ferriitti ( $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ )
- Kun klinkkeri jauhetaan hienoksi siihen lisätään kalsiumsulfaattia (kipsiä) ( $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) sitoutumisajan säätämiseksi ja
- seosaineita haluttujen ominaisuuksien aikaansaamiseksi



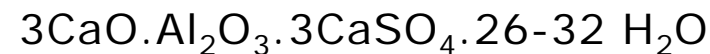


# Ettringiitti

## Kun sementti reagoi

### Sementin reagoidessa

- C3A reagoisi nopeasti veden kanssa muodostaen aluminaattihydraatteja, mikä johtaisi massan nopeaan sitoutumiseen (jäykistymiseen), ellei sementtiin olisi lisätty kipsiä. Nyt alkuvaiheessa hydratoituvan C3A:n osuus on merkittävästi pienempi ja betoni pysyy työstettävänä.
- Kalsiumsulfaatin ja C3A:n välisessä reaktiossa muodostuu ettringiittiä:



- Kun kipsi on kulunut loppuun hydrataation hidastuvassa tai loppuvaiheessa, ettringiitti alkaa reagoida C3A:n kanssa muodostaen monosulfaattia (3C4A $\bar{\text{S}}\text{H}12$ )
- Plastisessa muodossa olevassa sementtipastassa ettringiitin muodostumisella ei ole merkitystä betonin ominaisuuksiin, kaikki kiteytymät "mahtuvat" plastiseen matriisiin



# Ettringiitti

## Kovettunut betoni

- Ettringiitti on portlandsementin varhainen hydrataatiotuote, jota syntyy ja on / on ollut kaikissa betoneissa
- Kovettuneessa betonissa olevat primääri ettringiitti ja monosulfaatti ovat raekooltaan niin pieniä, että niitä ei ohuthietutkimuksella voi nähdä. Havaitseminen vaatii SEM-tutkimusta tai esim. XRD-analyysiä
- **Tavanomaisesti tiivistys- ja suojahuokoissa olevat ettringiittikiteytymät ovat liuennutta ja uudelleenkiteytyntä alkuvaiheen ettringiittiä**



# Ettringiitti

Kovettunut betoni, case: julkisivujen kuntotutkimus

## Ohuthietutkimus

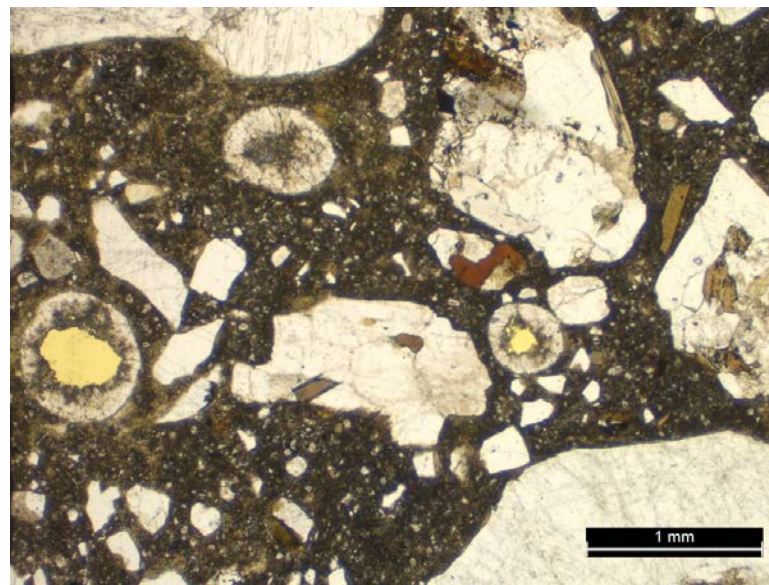
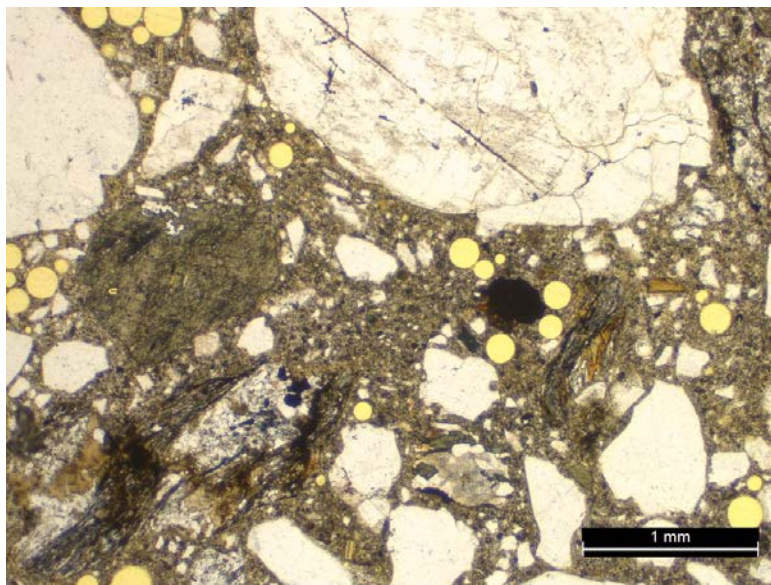
Pohjoinen – itä: ei ettringiittiä huokosissa

Etelä – länsi: runsaasti ettringiittiä huokosissa

## XRD-analyysi

Pohjoinen – itä & etelä – länsi

Betoneissa yhtä paljon ettringiittiä





# Ettringiitti

Kovettunut betoni – muutakin kuin primääriä ettringiittiä

- Myöhästynyt ettringiitin muodostuminen (engl. delayed ettringite formation, DEF)
- Ilmiö vaatii, että **betonin lämpötila on yli 70 °C** esimerkiksi lämpökäsittelyn tai hydrataation seurauksena
- **Alle tämän lämpötilan ei ilmiötä tapahdu**
- Edellyttää pitkäaikaista korkeaa kosteusrasitusta betonissa
- Kiteytyneen kiinteän ettringiitin tilavuuden kasvu voi olla 130-140 % lähtöaineiden tilavuuteen verrattuna > voi aiheuttaa paisuntaa ja halkeilua



# Ettringiitti

Kovettunut betoni – muutakin kuin primääriä ettringiittiä

- **Myöhästynyt ettringiitin muodostuminen** (engl. delayed ettringite formation, DEF)
- Mahdollisuus on suuri niissä elementeissä, joita on lämpökäsitelty voimakkaasti ja jotka joutuvat ankaraan kosteusrasitukseen
- erityisesti **1970-luvun elementit**
- Sitä, onko huokosten ja halkeamien ettringiittikiteytymissä kyseessä myöhästynyt ettringiitin muodostuminen vai kosteusrasitetussa betonista liuennut ja uudelleen kiteytynyt hydrataation alussa syntynyt ettringiitti, ei voi ratkaista ohuthietutkimuksella, vaan se edellyttää muita tutkimuksia ja betonin historiaselvitystä



# Ettringiitti

Kovettunut betoni – muutakin kuin primääriä ettringiittiä

## — Sulfaattikorrosio

- Betoniin tunkeutuneet sulfaatit reagoivat portlandiitin  $\text{Ca(OH)}_2$  kanssa, muodostaen kipsiä.
- Sulfaatti-ionit jatkavat reagointia muodostuneen kipsin ja kalsiumaluminaattihydraattien, monosulfaatin tai hydratoitumattoman C3A:n kanssa muodostaen ettringiittiä.
- Reaktiossa muodostuneen ettringiitin tilavuus on merkittävästi suurempi verrattuna reaktion lähtöaineisiin ja seuraukset voivat olla samanlaisia kuin DEF:ssä
- Tämä aiheuttaa betonin vaurioitumista paisumisen ja lujuuden menetyksen kautta
- Korroosioriski riippuu lukuisista betonin koostumus- ja tiiveysominaisuuksista sekä sulfaattityypistä ja sulfaattirasituksen muodoista



# Ettringiitti

Kovettunut betoni – muutakin kuin primääriä ettringiittiä

## — Sulfidikorroosio

- sulfidimineraalit voivat hapen ja betonin alkalisten huokosliuosten vaikutuksesta hapettua rautahydroksidiksi ja sulfaateiksi
- reaktioketjussa syntyy alkali- ja kalsiumsulfaatteja (ettringiittiä) sekä rautahydroksidia. Rautahydroksidi aiheuttaa ruostevalumia pintaan
- SFS-EN 12620 +A1 BETONIKIVIAINEKSET rajoittaa kokonaisrikin määrää kiviaineksessa
- muistuttaa AKR:ää siinä, että mekanismit ovat käytännössä monimutkaisia, samoin kuin reaktioon vaadittavat olosuhteet ja pitoisuudet



# Kuntotutkimukset ja ettringiitti

## Tulosten ymmärtäminen ja sudenkuopat

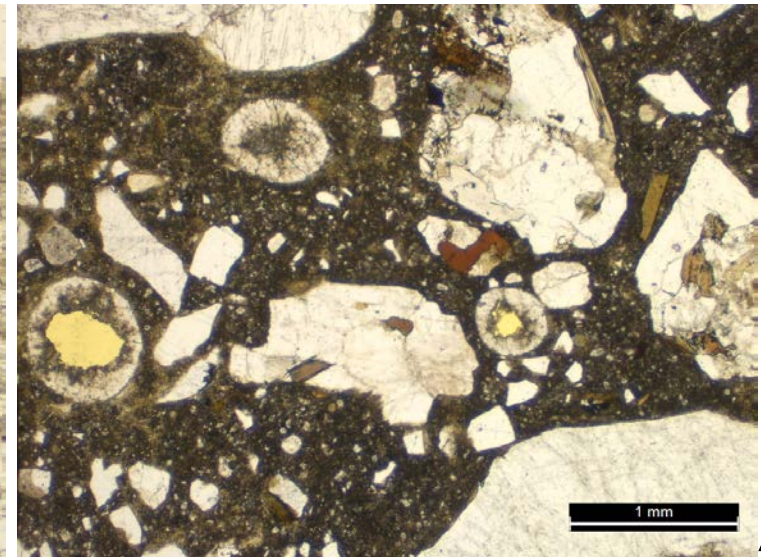
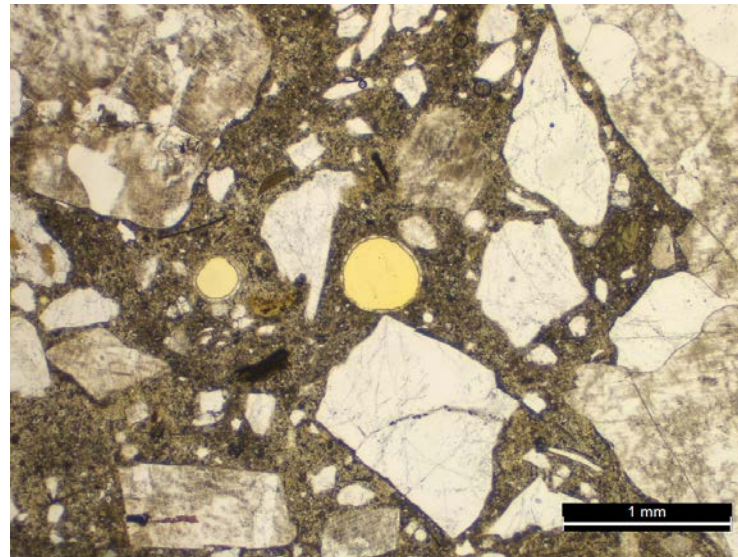
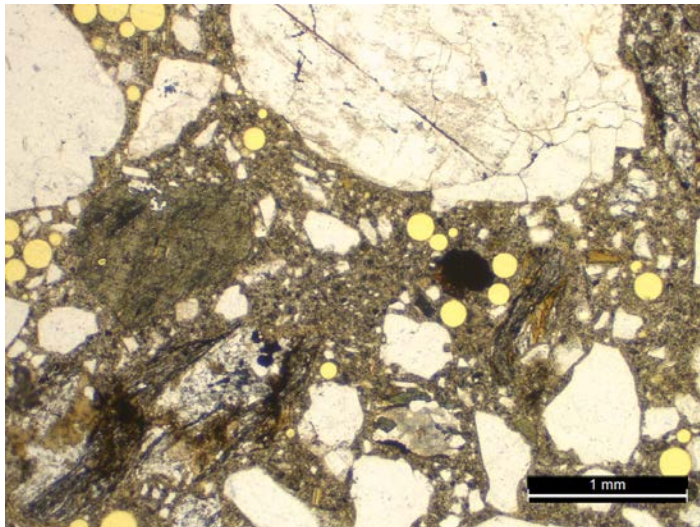
- Koska ohuthietutkimus on kvalitatiivinen analyysimenetelmä edellyttää se tutkijalta hyvää perehtyneisyyttä ja paitsi oman tutkimusalan, niin myös betonitekniikan tuntemusta siten, että ymmärtää tulosten merkityksen laajemmassa kontekstissa
- Puhuvatko **ohuthietutkija**, **kuntotutkija** ja **korjaussuunnittelija** samaa kieltä ja ymmärtävätkö he toisiaan: **eivät välttämättä**
- Syntyy mahdollisesti "rikkinäinen puhelin", jossa analyysitulokset ketjussa muuttuvat



# Kuntotutkimukset ja ettringiitti

## Tulosten ymmärtäminen ja sudenkuopat

- **Ohuthietutkija** tekee kvalitatiivista analyysiä ja määrittää ettringiitin määrän sanallisesti tai lukuarvolla ja voi vielä havainnollistaa kuvalla
  - Ettringiittiä ei ole, on vähän, on paljon, lähes kaikki huokokset ovat täynnä, jne.
  - Halkeamat ja huokokset ovat monin paikoin täynnä ettringiittiä
  - Betonissa on käynnissä myöhästynyt ettringiittireaktio





# Kuntotutkimukset ja ettringiitti

## Tulosten ymmärtäminen ja sudenkuopat

- **Kuntotutkija** tekee omat johtopäätöksensä ettringiitin merkityksen osalta ohuthieraportin pohjalta. Jotta asia tulisi varmistettua ja ettringiitin merkitys huomioitua, kuntotutkija voi hieman vielä korostaa asiaa
  - Huokosissa on jonkin verran ettringiittiä ja osa pienimmistä huokosista on täynnä ettringiittiä  
>>>>>>
  - Huokokset ovat laajalti täynnä ettringiittiä ja betonissa on käynnissä ettringiittireaktio
- **Korjaussuunnittelija** pohtii kannattaako koko rakennetta enää korjata, koska siellä on vakava ettringiittivaurio





# Kuntotutkimukset ja ettringiitti

Case: verkkohalkeilua julkisivupinnassa

- **Ohuthietutkimus:** Huokostäytteitä esiintyy kohtalaisen yleisesti, mutta pääosin vähän. Pienimmät huokokset ovat kuitenkin paikoitelleen jo täyttyneet kokonaan, mikä todennäköisesti heikentää pakkasenkestävyyttä. Kokonaisuutena arvioituna tutkituissa näytteissä ei ole havaittavissa erityisen merkittäviä betonin laatupuutteita.
- **Lausunto:** Raportin perusteella on syytä epäillä, että betonia on lämmitetty liikaa valmistusprosessin aikana josta osoituksena havaitut ettringiitti täytteet huokosissa
  - >>> myöhästynyt ettringiittireaktio
- **Täydentävä tutkimus:** Julkisivupinnan verkkohalkeilu johtuu betonin suurehkosta sementtipastamäärstä ja kuivumisen synnyttämästä verkkohalkeilusta. Ettringiittiä on pieniä määriä huokosissa, voimakkaasta lämpökäsittelystä ei ole kyse



# Kuntotutkimukset ja ettringiitti

Ettringiitillä manataan usein rakenteen kohtaloa

- **Kuntotutkimus:** Betonissa havaittiin ohuthietutkimuksissa mikrohalkeilua, ettringiittiä ja alkalisilikageeliä. Betonin huokoset ja säröt olivat paikoin umpeutuneet em. kide- ja geeliaineista. Betonin lujuus on todennäköisesti heikentynyt edellä mainittujen havaintojen vaikutuksesta ja on todennäköistä, että betonin vaurioitumisnopeus tulee kiihtymään.
- **Täydentävä tutkimus:** Ettringiittikiteytymiä on betonien huokosissa pääasiassa melko vähän tai vähän, kohtalaisesti muutamassa näytteessä ja ei lainkaan yhdessä näytteessä, eli ettringiitin osalta ei betoneissa ole riskiä. Puristuslujuus ja vetolujuus ovat hyviä



# Kuntotutkimukset ja ettringiitti

## Ettringiitti ja pakkasenkestävyys

- Runsaat ettringiittikiteytymät ovat arviolta seurausta kosteusrasituksesta, josta myös sideaineen liukeneminen johtuu.
- Pihakannen betoni on lisähuokostettu, mutta ettringiittikiteytymät ovat umpeuttaneet huokosia siinä määrin, ettei betoni arviolta huokosrakenteensa perusteella ole pakkasenkestävää kosteusrasituksessa.
- Näytteiden huokostiloissa havaittiin haitallisia ettringiitti- ja kalsiumhydroksidikiteytymiä. Kiteytymät viittaavat pitkään jatkuneeseen kosteusrasitukseen
- Ettringiitin ja pakkasrapautumisen väliltä löydettiin yhteys. Kun huokosissa on ettringiittiä, pakkasrapautuminen on todennäköisempää ja suuriasteisempaa kuin betonilla, jonka huokosissa ei ole täytteitä

# KIITOS!

Hannu Pyy  
TKL, senior adviser

AFRY Buildings Finland Oy

040 507 2071  
hannu.pyy@afry.com

