



Betonirakenteiden korjaaminen 2024

Hannu Pyy, TkL, Senior adviser

AFRY Buildins Finland Oy

Rakennusfysiikka

Betonirakenteiden kemialliset vauriot

3/18/2024

Sisältö

- Käydään yleisellä tasolla läpi betonirakenteiden eri vaurioitumismekanismien keskinäisiä vuorovaikutuksia ja niistä johtuvaa vaurioitumista
- Betonin tilavuuden muutokset
- Betonin osa-aineista johtuvat tekijät
- Teräskorroosion käynnistyminen
- Karbonatisoituminen
- Kloridit
- Kemiallisten aineiden reaktiot
 - Ettringiitti
 - Sulfaatti
 - Sulfidit
 - Alkali-kiviainesreaktio
- Tulipalo

Sisältö

Kemialliset vauriot

- **Kemiallisen ilmiön tai rasituksen aiheuttamat** betonin paisumis-/rapautumisilmiöt
- Raudoitteiden korroosio (käynnistyminen)
- Muut kemiallisten aineiden aiheuttamat vauriomekanismit

Kemialliset vauriot

- Karbonatisoituminen: (XC0, XC1, XC2, XC3, XC4)
- Merivesirasitus: XS1, XS2, XS3
- Suolarasitus muusta kuin merivedestä: XD1, XD2, XD3
- Kemiallinen rasitus: XA1, XA2, XA3

Kemiallisessa korroosiossa on aina kyse betonissa tapahtuvasta kemiallisesta muutoksesta, jossa on yleensä aina kosteus vaikuttamassa tapahtuviin muutoksiin

”Kuivassa betonissa eivät aineet liiku”

Fysikaalis - mekaanis - kemialliset betonivaurioita aiheuttavat tekijät

- Osa-aineet
- Vesi
- Pakkasrasitus
- Betonin karbonatisoituminen
- Suolat
- Teräskorroosio
- Kemiallisten aineiden korroosio
- Alkali-kiviainesreaktio
- Tulipalo



- Betonissa tapahtuvien kemiallisten vauriomekanismien seurauksena betonin tilavuus muuttuu

Osa-aineista (betonin valmistuksesta) johtuvat kemialliset betoniin vaikuttavat tekijät

- Kiviaineksen epäpuhtaudet
 - Humushappo
 - Jää, lumi
 - Epästabiilit ja reaktiiviset kiviainekset (rikkiyhdisteet, savi)
- Sideaineen koostumus ja laatu
 - Seosaineet
- Sekoitusveden ominaisuudet
 - Happamuus
 - Epäpuhtaudet



- Betonin tilavuudenmuutokset
 - kutistuminen ja paisuminen
- Pääasialliset syyt ovat:
 - betonista poistuu vettä
 - betonissa oleva vesi jäätyy
 - betonissa tapahtuu kemiallisia reaktioita,
 - rakenteen lämpötilan muutokset (kesä – talvi, tulipalot)

- Betonin tilavuudenmuutokset
 - **Kutistuminen** on kaikissa betonissa **luonnollinen mekanismi**
 - **Paisuminen sen sijaan liittyy aina betonin vaurioitumiseen tai vaurioitumispyrkimykseen**
- Kutistumisen perustyyppejä ovat:
 - **plastinen kutistuminen**
 - **plastinen painuminen**
 - **autogeeninen kutistuminen**
 - **kuivumiskutistuminen**
- Kutistuminen liittyy lähes aina veteen ja sen määrään betonissa
- Kuivumiskutistuminen on yleensä pääasiallinen kutistumisen muoto

- Betonin tilavuudenmuutokset

- Paisuminen

- Betonin paisumista / paisumispyrkimystä (pakkovoimia) syntyy, kun betoniin imeytynyt vesi jäätyy tai kun betonin sisäiset (sementtikiven tai raudoituksen) kemialliset reaktiot tapahtuvat ja tuottavat reaktiotuotteita, joiden tilavuus on suurempi kuin alkuperäinen tilavuus.

- Teräskorroosio

- Sulfaattihyökkäys (sulfate attack) , jonka yhteydessä muodostuneen ettringiitin tilavuus on alkuperäisten reaktiotuotteiden tilavuutta huomattavasti suurempi

- Myöhästynyt ettringiittireaktio (delayed ettringite formation), joka tuottaa vastaavia reaktiotuotteita

- Alkalikiviainesreaktio (alkali aggregate reaction), jossa syntyvä alkalipiigeeli tuottaa pakkovoimia betoniin

>> johtavat paisumiseen, joka voi johtaa halkeiluun ja lohkeiluun

• Betonin tilavuudenmuutokset

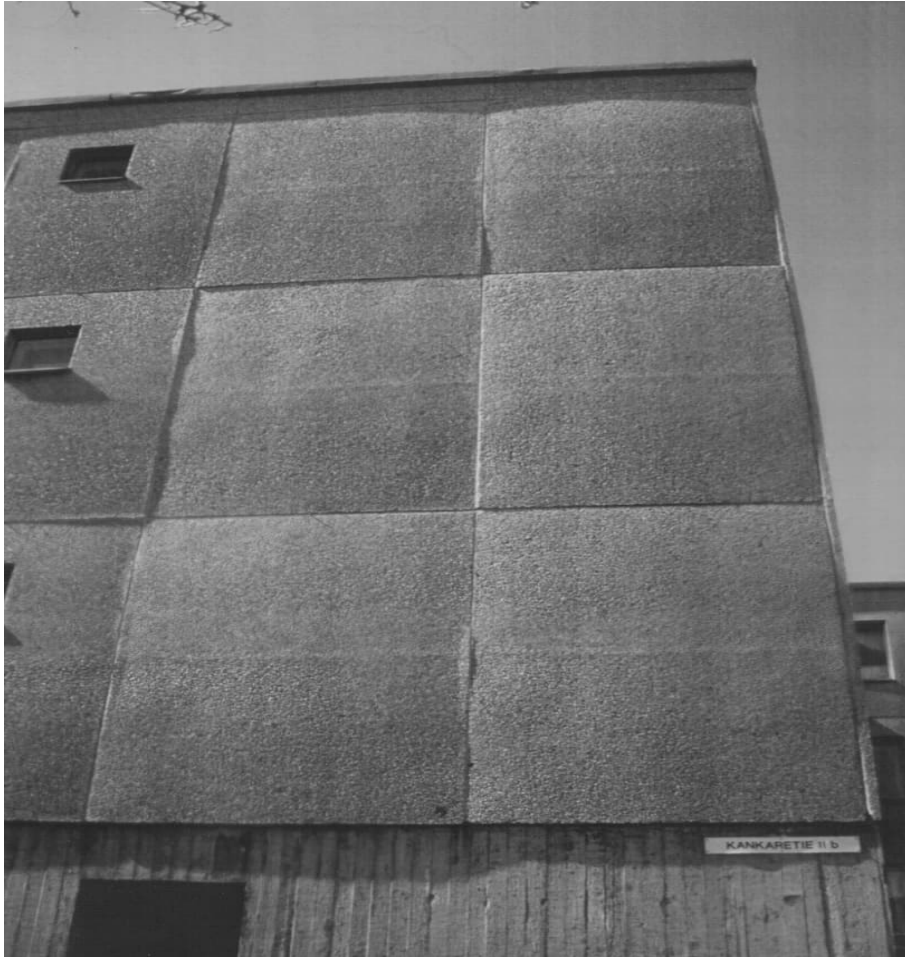
By201 2018

Taulukko 11. Betonin kemiallisia vauriotekijöitä ja niiden vauriomekanismit sekä vaikutus betonirakentamisessa. [8, s. 131]

Kemialliset vauriotekijät	Mekanismi	Vaikutus
Pehmeä vesi	liukeneminen	betonin rapautuminen
Happo	liukeneminen	betonin rapautuminen
Happo	neutraloituminen	teräskorroosion aktivoituminen
Happamat kaasut: hiilidioksidi, rikki- ja typpioksidit	neutraloituminen karbonatisoituminen	teräskorroosion aktivoituminen mikrorakenteen epäedullinen muuttuminen
Kloridit	passiivikalvon rikkoutuminen	teräskorroosion aktivoituminen
Aktiivitulassa olevat terästangot + happi + vesi	korroosio	terästankojen paisuminen, pinta-alan ja tartunnan menetys
Jännitys, kloridit	jännityskorroosio (vetyhaurastuminen)	jänneraudoitteiden katkeaminen
Sulfaatit, merivesi, maaperä	kiteytymispaine kemialliset muutokset	betonin paisuminen betonin rapautuminen
Alkalit, silikaattikiviaines	alkali-piuhapporeaktio alkali-silikaattireaktio	betonin paisuminen betonin rapautuminen
Alkalit, karbonaattikiviaines	karbonaattireaktio	betonin paisuminen betonin rapautuminen

Betonirakenteiden kemialliset vauriot – Hannu Pyy

- Betonin tilavuudenmuutokset
 - Paisuminen

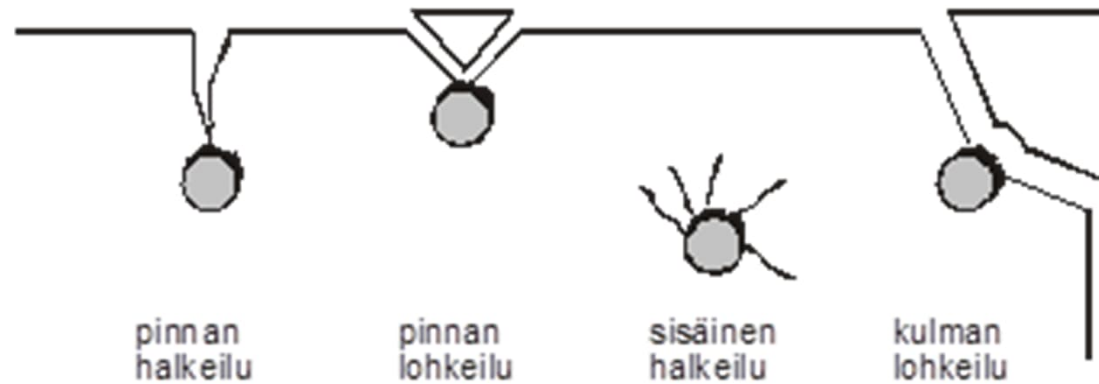


- **Teräskorroosio**

- Betonin korkeasta alkalisuudesta (pH 12-13) johtuen betonissa olevan teräksen pinnalle muodostuu ohut oksidikalvo, joka estää sähkökemiallisen korroosion (ns. teräksen passivoituminen).
- Toisaalta riittävän paksu ja tiivis suojaava betonikerros estää / hidastaa aggressiivisten aineiden (mm. hapot ja kloridit) pääsyn kosketuksiin raudoituksen kanssa.
- Betonin sisällä olevan teräksen passiivisuus voidaan menettää ja korroosio voi alkaa pääasiassa seuraavien kahden tekijän vaikutuksesta:
 - betonin karbonatisoituminen
 - kloridien läsnäolo raudoitusta ympäröivässä betonissa.

- **Teräskorroosio**

- Teräskorroosion vaikutukset näkyvät yleensä ensin raudoitteita peittävän betonikerroksen halkeamina ja lohkeamina, koska korroosiotuotteet vaativat huomattavasti alkuperäistä tilavuutta suuremman tilan
- Korroosio aiheuttaa betonipinnan halkeilua ja lohkeilua ja betonin sisäistä halkeilua

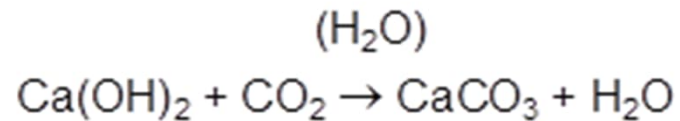


- Korroosion seurauksena raudoituksen pinta muuttuu kemiallisesti ja liukenee materiaalia, mikä johtaa raudoitteiden poikkileikkausalan pienenemiseen ja heikentää rakenteen kantavuutta.

- **Karbonatisoituminen**

- Karbonatisoituminen on betonin ns. **neutraloitumisreaktio**, jonka seurauksena betonin huokosveden pH-arvo alenee.

- Reaktiossa betonin kalsiumhydroksidi reagoi ilman hiilidioksidin CO₂ kanssa:



- Karbonatisoituminen etenee vähitellen rintamana betonin pinnasta alkaen.
- Betonin pH-arvo karbonisoituneella vyöhykkeellä laskee arvosta n. 12-13 likimain arvoon 8,5-9.

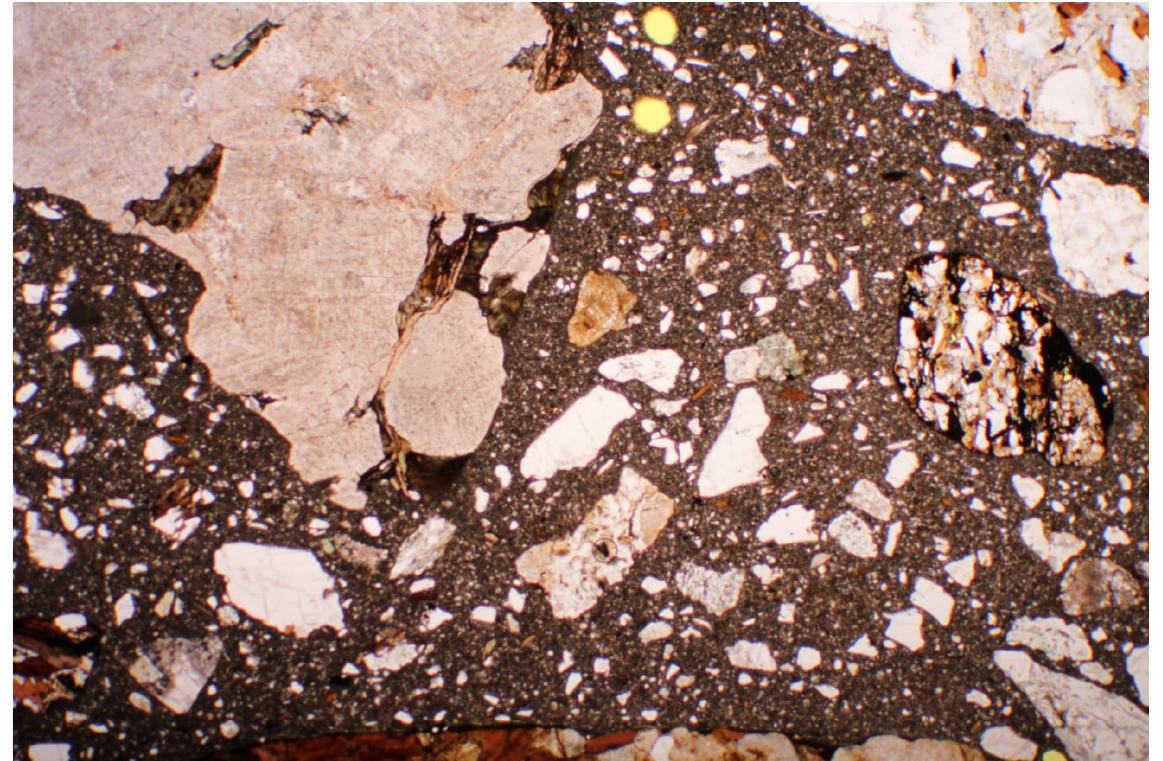
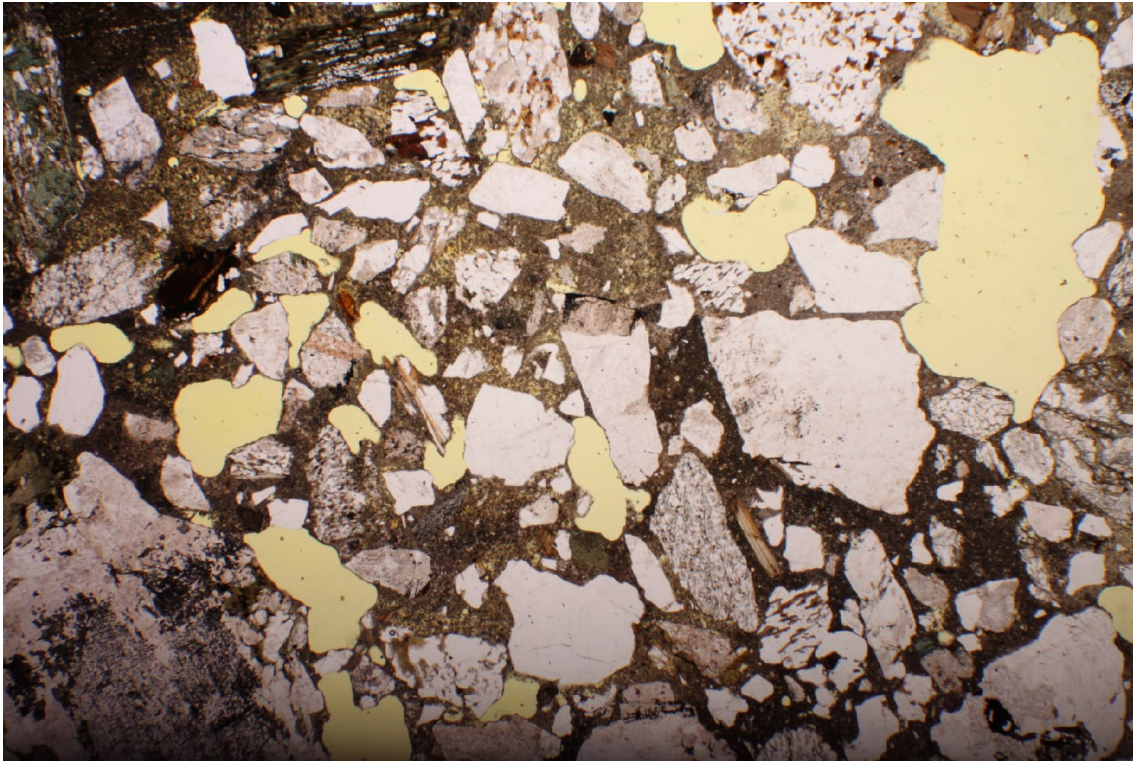
- **Karbonatisoituminen**

- Karbonatisoitumisen etenemisnopeus riippuu pääasiassa seuraavista tekijöistä:
 - **Betonin diffuusiovastuksesta hiilidioksidin tunkeutumista vastaan**
 - **Ympäröivän ilman hiilidioksidipitoisuudesta (ulkobetonirakenteissa käytännössä vakio)**
 - **Karbonisoituvan aineen määrästä (betonin sementtimäärä).**
- Betonin huokosrakenne ja kosteuspitoisuus vaikuttavat siihen, miten nopeasti hiilidioksidi tunkeutuu betoniin.
- Betonin huokosrakteeseen ja tiiviyyteen vaikuttavat eniten betonin vesisementtisuhte ja hydrataatioaste.
- Vesisementtisuhteen aletessa ja sementtimäärän kasvaessa ja samalla lujuuden kasvaessa tiiviys lisääntyy voimakkaasti ja karbonatisoituminen hidastuu
- Halkeamat lisäävät hiilidioksidin tunkeutumista paikallisesti

Betonirakenteiden kemialliset vauriot – Hannu Pyy

- **Karbonatisoituminen**

- Harva betoni: pieni sementtimäärä, suuri v/s, runsaasti kapillaarihuokoisuutta ja harvatiloja > karb. nopeaa
- Tiivis betoni: suuri sementtimäärä, pieni v/s, vähän kapillaarihuokoisuutta ja harvatiloja > karb. hidasta



- **Karbonatisoituminen**

- Betonin kosteuspitoisuus vaikuttaa karbonatisoitumiseen siten, että huokosverkoston täyttyessä vedellä hiilidioksidin tunkeutuminen vähenee.
- Vesi hidastaa siten tehokkaasti karbonatisoitumista. Esim. parvekelaattojen yläpinnoissa, silloissa ja uima-altaiden rakenteissa betonin karbonatisoituminen on tyypillisesti hyvin hidasta.
- Toisaalta hyvin kuivissa olosuhteissa (alle 30 % RH) karbonatisoituminen pysähtyy, koska reaktio voi tapahtua ainoastaan vesiliuoksessa.

- Karbonatisoituminen

- **Karbonatisoitumissyvyyden mittaaminen**

- Poralieriön pinnasta tai sahatusta / halkaistusta lieriöstä **fenoliftaleiini-indikaattorilla** (pH-indikaattori)

- **Ohuthienäytteestä**, muutos mineraalikoostumuksessa

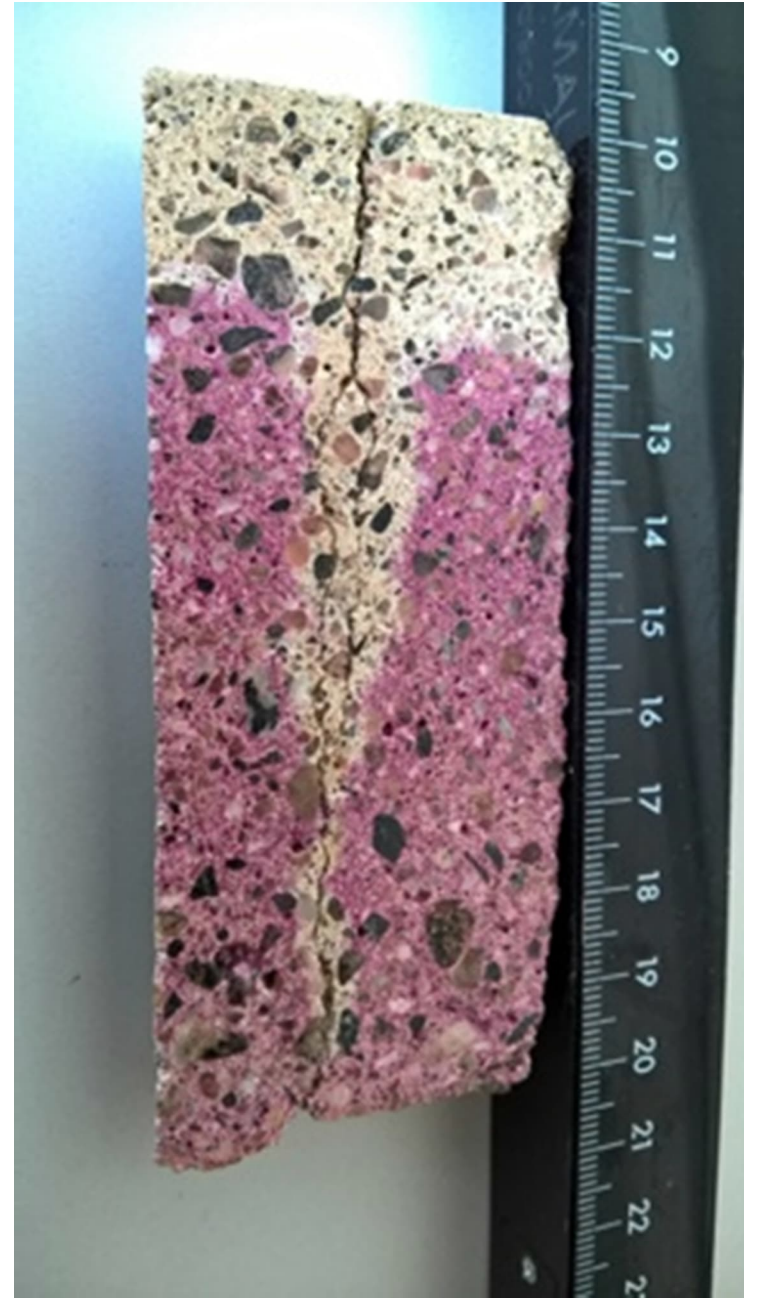
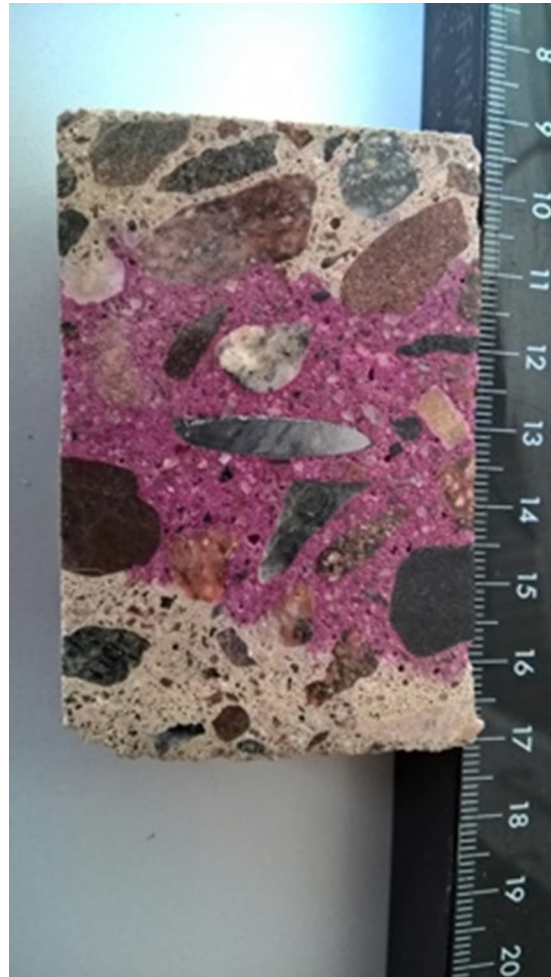
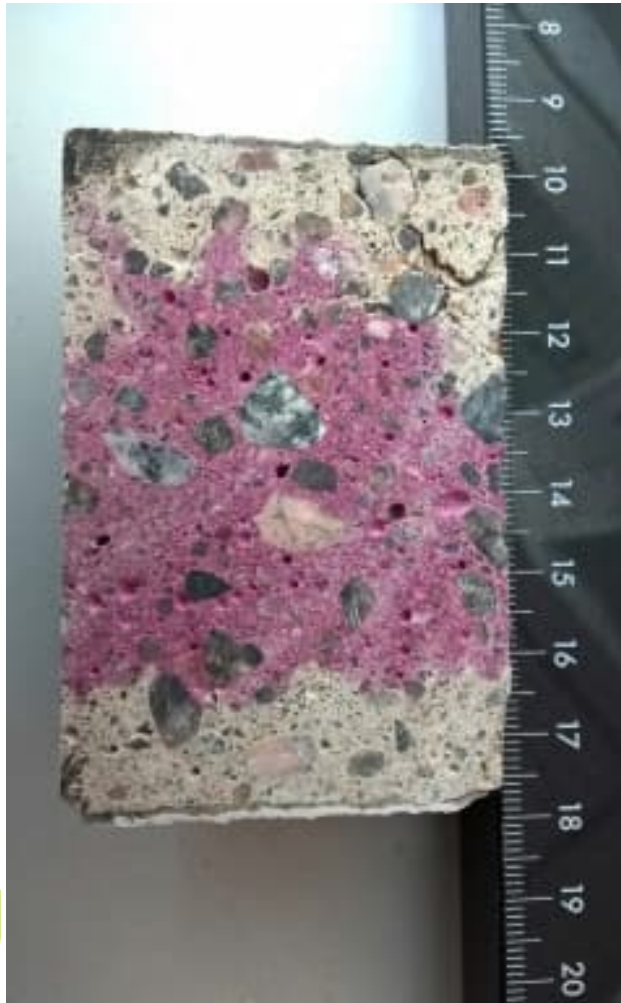
- $\text{CaOH}_2 \gg \text{CaCO}_3$,

- **Mittaavat eri asiaa, mutta antavat lähes saman tulokset (\pm muutama mm)**

Betonirakenteiden kemialliset vauriot – Hannu Pyy

- Karbonatisoituminen

- Karbonatisoitumisen eteneminen karbonatisoitumissyvyyden mittaaminen



- **Kloridit**

- Betonissa oleva riittävän korkea, ns. kynnyksarvon (kriittinen kloridipitoisuus) ylittävä kloridipitoisuus voi käynnistää betoniraudotteiden korroosion, vaikka betoni ei ole karbonatisoitunut.
- by 42: kynnyksarvona pidetään noin 0,03...0,07 p-% kloridipitoisuutta betonin painosta
 - 0,03 p-% koskee lähinnä jännitetyjä betonirakenteita
 - 0,07 p-% jännittämättömiä betonirakenteita

- **Kloridit**
- Vanhoissa julkisivu- ja parveke-elementeissä on mahdollista, että betonin valmistuksessa on käytetty kiihdyttävänä lisäaineena kalsiumkloridia (CaCl_2), jonka määrä on yleensä moninkertainen terästen korroosion kynnyksarvoon verrattuna.
- Klorideja voi päätyä betoniin myös ulkoisista rasituslähteistä:
 - Liukkauden torjuntaan käytetyt maantiesuolat
 - Autojen tuoma maantiesuola pysäköintihalleissa
 - Parvekkeilla käytetty sulatussuola
 - Merirakenteet

- Yhdistelmä teräskorroosio karbonatisoituneessa ja/tai kloridipitoisessa betonissa.
- korroosionopeuteen vaikuttavat pääasiassa seuraavat viisi tekijää:
 - huokosverkoston kosteuspitoisuus, joka vaikuttaa elektrolyytin määrään ja hapen saantiin
 - rakenteen lämpötila, jonka kohoaminen nopeuttaa korroosiota
 - betonin kloridipitoisuus
 - betonin tiiviys
 - raudoitusten suojabetonipeitteen paksuus (betonipeitepaksuus vaikuttaa toisaalta kosteuspitoisuuteen ja toisaalta käytettävissä olevan hapen määrään).
- Huokosverkoston suhteellisen kosteuden lisääntyessä kasvaa betonin sähkönjohtavuus huomattavasti. Teräksen korroosion katsotaan yleensä alkavan, kun suhteellinen kosteus betonissa ylittää 65-70 %RH. Merkittävästi korroosionopeus kasvaa suhteellisen kosteuden noustessa yli 80 - 85 %RH:n tason

Betonirakenteiden kemialliset vauriot – Hannu Pyy

- Muut kemiallisten aineiden aiheuttamat korroosioreaktiot



Betonirakenteiden kemialliset vauriot – Hannu Pyy

- Kemiallisten aineiden aiheuttama korroosio
 - **Kemiallinen korroosio aiheutuu joko sisäisestä tai ulkoisesta rasituksesta**
 - **Sisäistä rasitusta aiheuttavat**
 - **ettringiittireaktioista ns. myöhästynyt ettringiittireaktio** (*late ettringite formation*)
 - **humus**
 - **alkali-kiviainesreaktio**
 - **sulfaatti**
 - **sulfidit**
 - **Ulkoisia rasitustekijöitä ovat**
 - **Hapot** liuottavat sementin reaktiotuotteita, heikentävät niiden ominaisuuksia tai synnyttävät paisuvia yhdisteitä
 - **Pehmeä vesi** (sateesta ja lumen- ja jäänsulamisesta muodostunutta ja sisältää vain vähän kalsiumia). Vesi liuottaa betonin pinnassa olevaa kalsiumhydroksidia muodostaen kalkkihärmettä. Liukenemista tapahtuu niin pitkään, että kemiallinen tasapaino saavutetaan. Reaktio voi jatkua, jos vesi on virtaavaa ja kylläinen liuos pääsee poistumaan. Tämän tyyppisen vauriot ovat kuitenkin vain esteettisiä

Betonirakenteiden kemialliset vauriot – Hannu Pyy

- Kemiallisten aineiden aiheuttama korroosio
- Ettringiitti
- On portlandsementin hydrataatiotuote, jota esiintyy kaikissa betoneissa.
 - "Tavanomainen" ettringiitti syntyy sementin reaktion alkuvaiheessa
 - Ettringiitti on kalsium-alumiinisulfaatti: $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$
- 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 suojahuokosissa olevat ettringiittikiteytymät ovat liuennutta ja uudelleen kiteytyneitä alkuvaiheen ettringiittiä

Betonirakenteiden kemialliset vauriot – Hannu Pyy

- Kemiallisten aineiden aiheuttama korroosio
- Ettringiitti

Ohuthietutkimus

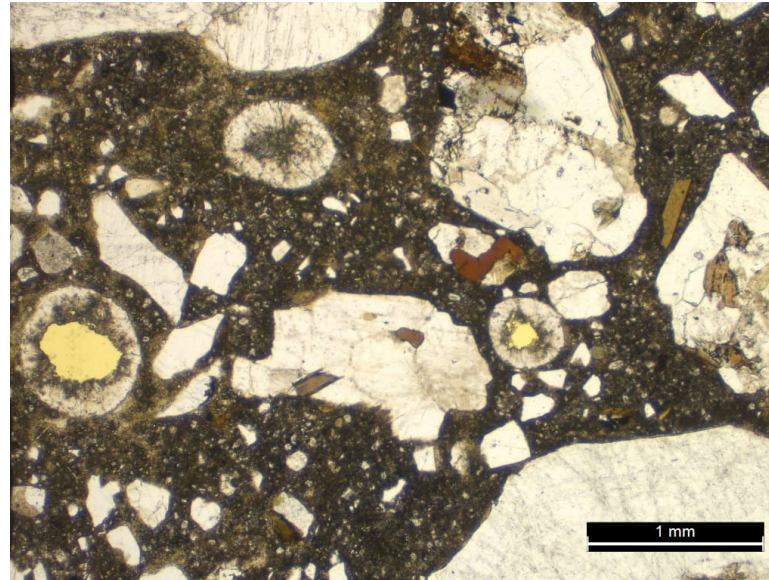
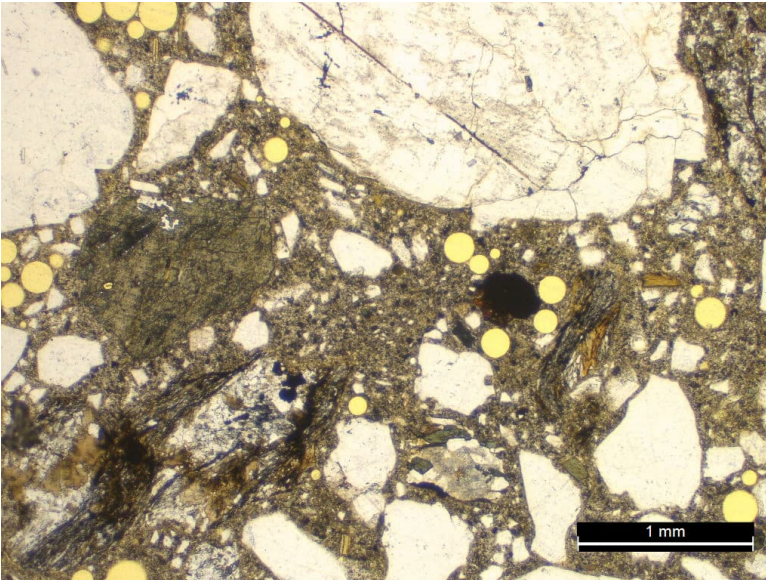
Pohjoinen – itä: ei ettringiittiä huokosissa

Etelä – länsi: runsaasti ettringiittiä huokosissa

XRD-analyysi

Pohjoinen – itä & etelä – länsi

Betoneissa yhtä paljon ettringiittiä



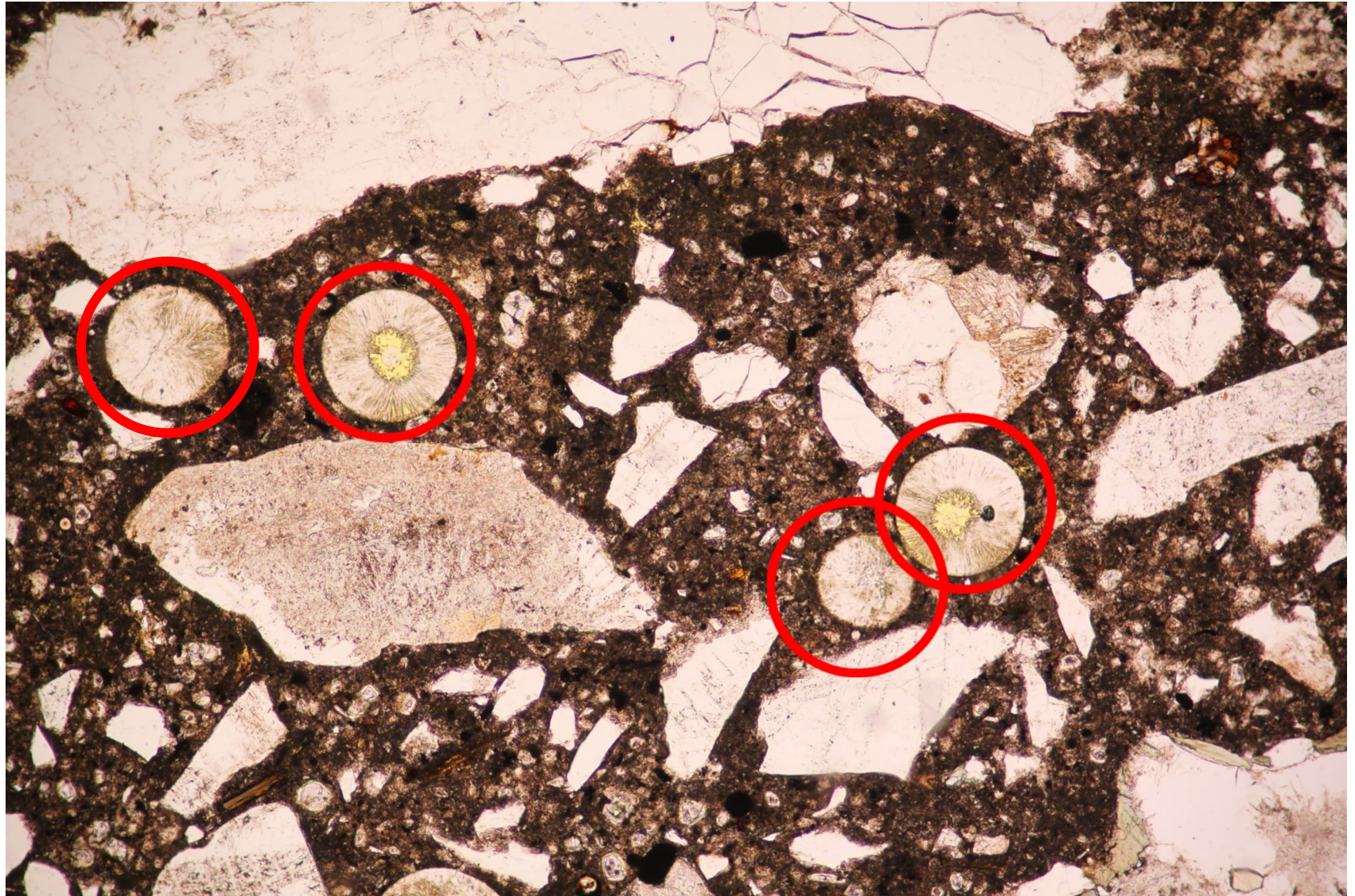
Betonirakenteiden kemialliset vauriot – Hannu Pyy

- Kemiallisten aineiden aiheuttama korroosio
- Ettringiitti
- 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

- Kemiallisten aineiden aiheuttama korroosio
- Ettringiitti
- 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
- Ettringiittireaktion seurauksena syntynyt rapautuminen muistuttaa rakenteessa tavanomaista pakkasrapautumaa.

Betonirakenteiden kemialliset vauriot – Hannu Pyy

- Kemiallisten aineiden aiheuttama korroosio
- Ettringiitti



*Runsaita
ettringiittikiteytymiä
betonin huokosissa*

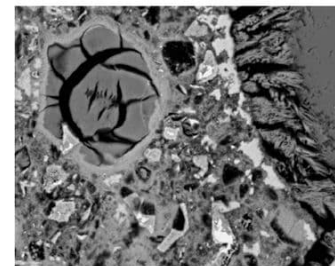
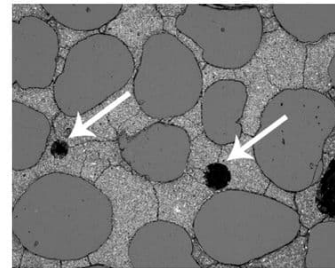
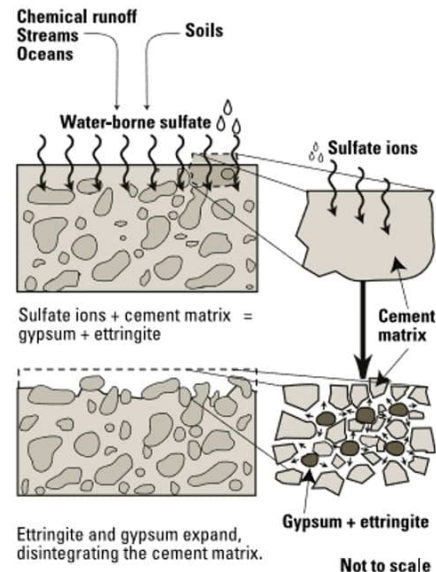
- **Kemiallisten aineiden aiheuttama korroosio**

- Kemiallisesti korrodoiville aineille on esitetty raja-arvot pohjavedessä ja maaperässä betonin eri rasitusluokille XA1, XA2 ja XA3 (By65)
- **Sulfaattipitoisessa** ympäristössä käytetään luokissa XA2 ja XA3 sulfaatin kestävästä sementistä tai sideaineen tulee sisältää masuunikuonaa vähintään 70 %
- Yhdyskuntajätteen tiedetään sisältävän rikkiyhdisteitä, joten ettringiittireaktio on mahdollinen tavallisia sementtejä käytettäessä betonirakenteissa, jotka altistuvat ko. rasitukselle.
- Suomessa sementti katsotaan sulfaatinkestäväksi, kun sementin C3A – pitoisuus on enintään 3,0 paino %. Tällä pyritään estämään sementtikiven ettringiittireaktio sulfaattipitoisessa ympäristössä.
- Kotimaisista sementeistä vain **SR-sementti** CEM I 42,5 N- SR3 täyttää tämän vaatimuksen

- Kemiallisten aineiden aiheuttama korroosio
 - Sulfaattikorroosio
 - Betoniin tunkeutuneet sulfaatit reagoivat portlandiitin Ca(OH)_2 kanssa, muodostaen kipsiä.
 - Sulfaatti-ionit jatkavat reagointia muodostuneen kipsin ja kalsiumaluminaattihydraattien, monosulfaatin tai hydratoitumattoman C3A:n kanssa muodostaen ettringiittiä.
 - Ettringiitin tilavuus on merkittävästi suurempi verrattuna reaktion lähtöaineisiin
 - Esiintyessään suuressa määrin voi aiheuttaa betonin vaurioitumisen paisumisen ja lujuuden menetyksen kautta

Betonirakenteiden kemialliset vauriot – Hannu Pyy

- Kemiallisten aineiden aiheuttama korroosio
 - Sulfaattikorroosio
 - Yleistä sulfaattipitoisuuden raja-arvoa ei betonille ole, koska korroosioriski riippuu lukuisista betonin koostumus- ja tiiveysominaisuuksista sekä sulfaatista ja sulfaattirasituksen muodoista.
 - Yleisesti olemassa olevan tutkimustiedon perusteella voidaan kuitenkin arvioida, että usein korroosioriski alkaa merkittävästi kasvaa, kun betonin sulfaattipitoisuus lähestyy 5 p-%:a sementin painosta



Betonirakenteiden kemialliset vauriot – Hannu Pyy

- Kemiallisten aineiden aiheuttama korroosio
Esimerkki sulfaattikorroosiosta jätteenkäsittelylaitoksella



- Kemiallisten aineiden aiheuttama korroosio
 - **Sulfidikorroosio**
 - Tunnettu ongelma maailmalla 1950-luvulta lähtien
 - Ei yleisesti laaja ongelma, mutta paikallisesti aiheuttanut vakavia ongelmia
 - Jos paikallinen kiviaineslähde on **pyriitti- / magneettikiisupitoinen** ja siitä otetaan pitkään kiveä, voivat seuraukset olla paikallisesti merkittäviä

Betonirakenteiden kemialliset vauriot – Hannu Pyy

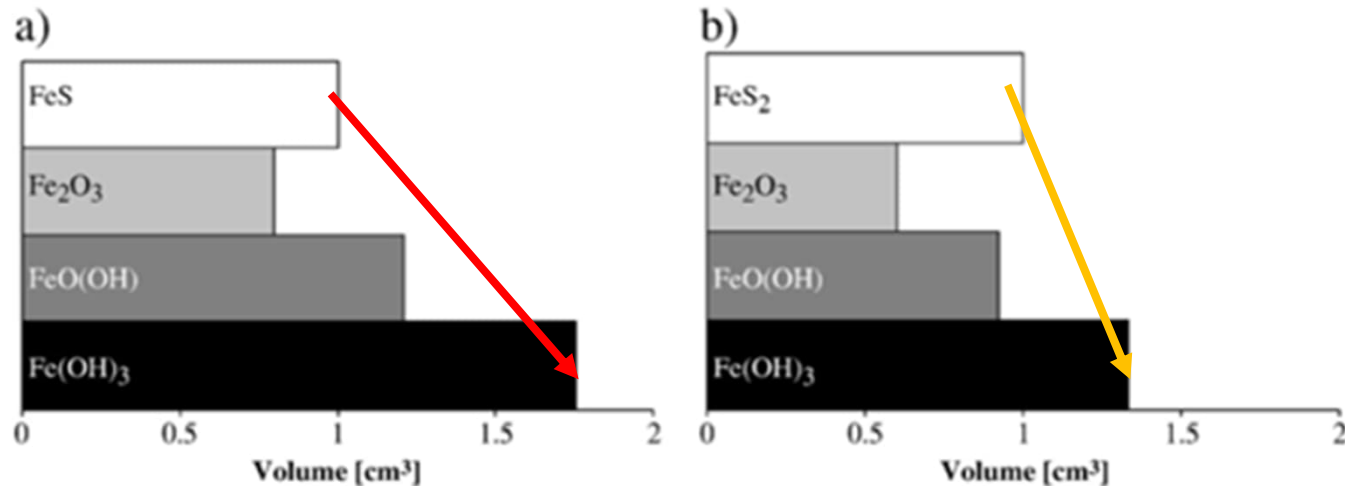
- Kemiallisten aineiden aiheuttama korroosio
 - **Sulfidikorroosio**
 - Mekanismi:
 - sulfidimineraalit voivat hapen ja betonin alkalisten huokosliuosten vaikutuksesta hapettua rautahydroksidiksi ja sulfaateiksi
 - syntyneiden reaktiotuotteiden tilavuus on suurempi kuin alkuperäisen mineraaliaineksen, jolloin syntyy lohkeamia (pop-outs) lähellä pintaa olevien kiviainesten kohdalle sekä voimakkaissa reaktioissa halkeilua syvemmälle betoniin
 - reaktioketjussa syntyy alkali- ja kalsiumsulfaatteja (ettringiitti) sekä rautahydroksidia. Rautahydroksidi aiheuttaa ruostealumia pintaan
 - muistuttaa AKR:ää siinä, että mekanismit ovat käytännössä monimutkaisia, samoin kuin reaktioon vaadittavat olosuhteet ja pitoisuudet
 - edelleen tarvitaan aiheen perustutkimusta

Betonirakenteiden kemialliset vauriot – Hannu Pyy

- Kemiallisten aineiden aiheuttama korroosio
 - **Sulfidikorroosio**
 - Merkittävimmät sulfidimineraalit kiviaineksessa:
 - **Magneetikiisu (pyrrotiitti) – FeS** (Fe_{1-x}S ($x: 0-0.125$)) **Pyriitti (rikkikiisu) – FeS₂**
 - Magneetikiisun a) ja pyriitin b) tilavuuden muutos hapettumisreaktiossa

Oxidating iron sulfides

- Substantial (theoretical) volume increase due to oxidation



Betonirakenteiden kemialliset vauriot – Hannu Pyy

- Kemiallisten aineiden aiheuttama korroosio
 - **Sulfidikorroosio**
- Sulfidimineraalien rajoittaminen kiviaineksessa:
- SFS-EN 12620 +A1 BETONIKIVIAINEKSET
- 6.3.2 Kokonaisriikki
- Vaadittaessa kiviaineksen ja fillerikiviaineksen kokonaisriikin määrä määritettynä EN 1744-1 kohdan 11 mukaisesti, ei saa ylittää:
 - **1 p-% rikkiä (S) muilla kiviaineksilla**, kuin ilmajähdytetyllä masuunikuonalla (jolla raja 2 p-%)
 - Erityistä varovaisuutta tulee noudattaa, jos kiviaineksessa on **magneettikiisua**. Jos tämän mineraalin esiintyminen on tiedossa on **suurin sallittu kokonaisriikin määrä (S) 0,1 p-%**

Betonirakenteiden kemialliset vauriot – Hannu Pyy

- Kemiallisten aineiden aiheuttama korroosio
 - Sulfidikorroosio

Visual Inspection - Trois-Rivières Case Study



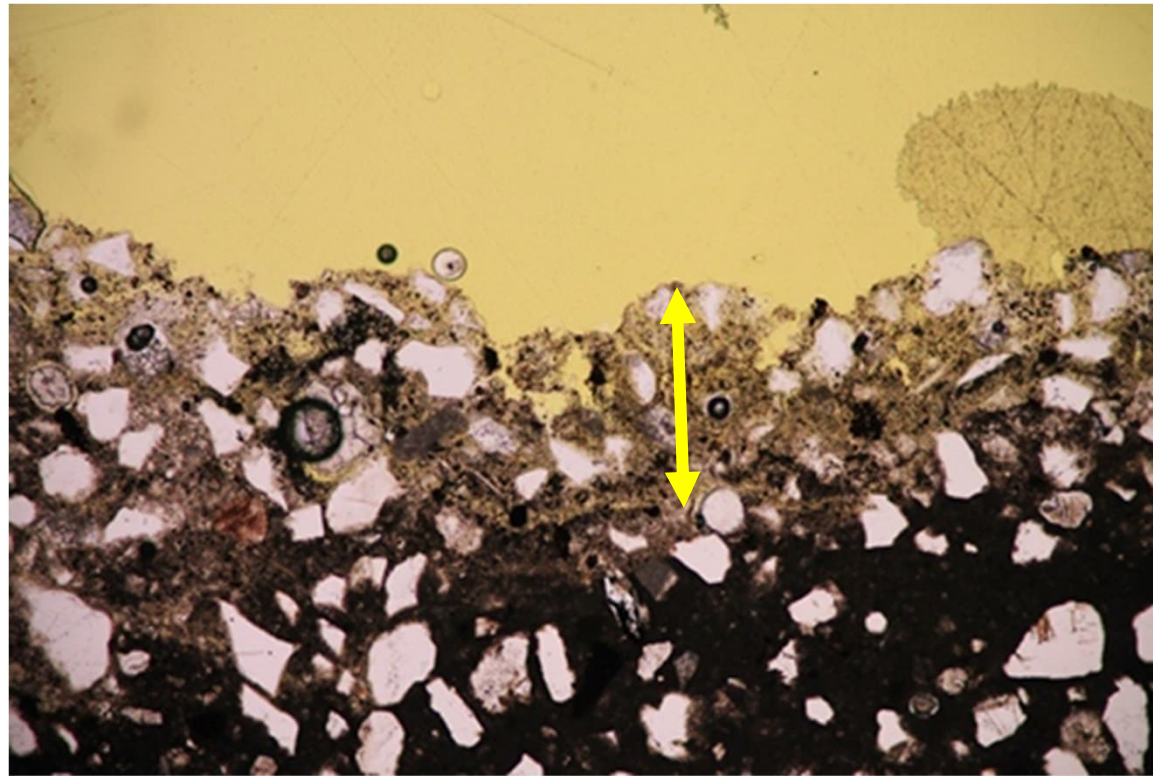
Julkisivukohde
Espoossa



Betonirakenteiden kemialliset vauriot – Hannu Pyy

- Kemiallisten aineiden aiheuttama korroosio
 - **Sulfidikorroosio**
- Sulfidimineraalien aiheuttamat riskit:
- **Pyriitti** rapautuu ilman ja veden vaikutuksesta luonnossa erittäin helposti ja syntyy rautasulfaatteja, rikkihappoa sekä rautahydroksideja >> johtaa kysymyksiin:
 - Onko luonnonsorassa kivirakeiden pinnoilla oleva pyriitti yleisesti rapautunutta (reagoinutta) niin, että reaktion aiheuttamaa ongelmaa ei esiinny enää betonissa (maailmalla ongelma kalliomursketta käytettäessä)
 - Onko sulfidikorroosio potentiaalinen riski, kun käytetään kalliomursketta, jossa jokaisen kivirakeen pinta on tuore murtopinta, jossa voi olla sulfidimineraaleja
 - Mitä tapahtuu, kun hyvälaatuisten luonnon- ja kalliokiviainesten saatavuus heikkenee ja joudutaan käyttämään heikompilaatuisia ja "epämääräisiä" kiviaineslähteitä
 - Osataanko ongelma tunnistaa Betoni- / sementti- / kiviainesteollisuuden ongelma?

- Kemiallisten aineiden aiheuttama korroosio
 - Ulkoisten **happorasitusten** aiheuttama korroosio
 - Korroosio (kemialliset reaktiot) tapahtuu ulkopinnasta (kosketuspinnasta) alkaen ja korroosio etenee rintamana syvemmälle betoniin >> betonin pinnata voi olla pehmeää ja korroosiotuotteiden peittämää, mutta reaktiorintaman takana betoni on tervettä ja kovaa



- Alkali-kiviainesreaktio (AKR)



- Alkalikiviainesreaktio

- Alkalikiviainesreaktio kuvattiin kirjallisuudessa ensimmäistä kertaa Yhdysvalloissa vuonna 1940
- Vanhojen tutkimusten uudelleenarviointi toi esille, että ilmiötä on tavattu jo 1900-luvun alussa
- Koska kyseessä oli aiemmin tunnistamaton reaktio herätti se myös epäluuloja ja kritiikkiä
- Professor Duff A. Abrams, PCA, ASCE, 1946:
 - *...hypoteesi alkalikiviainesreaktiosta perustuu vain epämääräisiin kielikuviin, perusteettomiin väitteisiin ja merkityksettömiin olosuhteisiin*
 - *...mitään todisteita ei ole siitä, että korkean alkalipitoisuuden sementti olisi vaikuttanut millään tavalla halkeiluun ja paisumiseen*

- Alkaliviainesreaktio

- AKR:n termistö

- Alkaliviainesreaktio (AKR), englanniksi alkali-aggregate reaction (AAR)
- Alkalipiiyhdistereaktio (ASR), englanniksi alkali-silica reaction (ASR)
- Reagoiva aines on kvartsimineraalin (SiO_2) tietyt muodot (opaali, kalsedoni, kristobaliitti, tridymiitti, vulkaaninen lasi, deformatunut, epätasapainossa oleva, huonosti kiteytynyt tai mikrosäröytynyt kvartsi, jne.)
 - Aiemmin ASR:n muotona pidettiin myös alkali-silikaattireaktiota (alkali silicate reaction) ja alkalikarbonaattireaktiota (alkali carbonate reaction (ACR))

- Alkalikiviainesreaktio

..... on yksinkertainen ja samalla monimutkainen ilmiö

- Alkalikiviainesreaktion mekanismi

- Kyse on kiviaineksen tiettyjen mineraalien (kvartsin (SiO_2) eri muodot) ja
- sementtikiven huokosveden sisältämien alkalien (Na^+ and K^+) ja hydroksyyli- (OH^-) ionien välisestä kemiallisesta reaktiosta

- Alkalikiviainesreaktio
- Alkalikiviainesreaktion mekanismi, [lyhyt oppimäärä](#)
 - Alkalikiviainesreaktio (= käytännössä alkalipiireaktio) vaatii toteutuakseen:
 1. Reaktiivista kiviainesta
 2. Suhteellisen korkeaa alkalisuutta
 3. Vettä / kosteutta betonissa
 - Jos yksikin ehto puuttuu, ei reaktio käynnisty
 - Jos yksikin tekijä reaktion aikana muuttuu alle tai yli kynnysarvon reaktio pysähtyy
 - Korkea lämpötila lisää reaktioherkkyyttä
 - Otollisia ovat kosteat lämpimät tilat, kuten uimahallit, paperitehtaat ja vastaavat teollisuuslaitokset

- Alkalikiviainesreaktio

- Alkalikiviainesreaktion mekanismi, [pitkä oppimäärä](#)

- Alkalikiviainesreaktio vaatii toteutuakseen 3 asiaa:

1. Reaktiivista kiviainesta

- Reagoiva mineraali on kivessä oleva **kvartsi** (SiO_2) ja mitä hienojakeisempaa, tai deformatuneempaa, sen reaktiivisempaa se on
- Jokaisella reaktiivisella kiviaineksella on tietty määrätaso betonissa, jossa reaktio on voimakkain
- Jos reaktiivinen aines on kokonaan reagoanut, reaktio pysähtyy

2. Suhteellisen korkeaa alkalisuutta

- Kiviainekset reagoivat tietyllä alkalisuuden tasolla, joka on suhteellisen korkea
- Jos alkalisuus alenee, reaktio voi pysähtyä tai jos alkalisuus nousee reaktio voi pysähtyä
- Kun kiviaineksen reaktiivisuus kasvaa, geelin muodostus voi tapahtua pienemmälläkin alkalimäärällä, jolloin AKR:n torjumiseen ei sementtivalinnalla (alhaisemman alkalitason sementti) yksin päästä

- Alkalikiviainesreaktio

- Alkalikiviainesreaktion mekanismi, [pitkä oppimäärä](#)

- Alkalikiviainesreaktio vaatii toteutuakseen 3 asiaa:

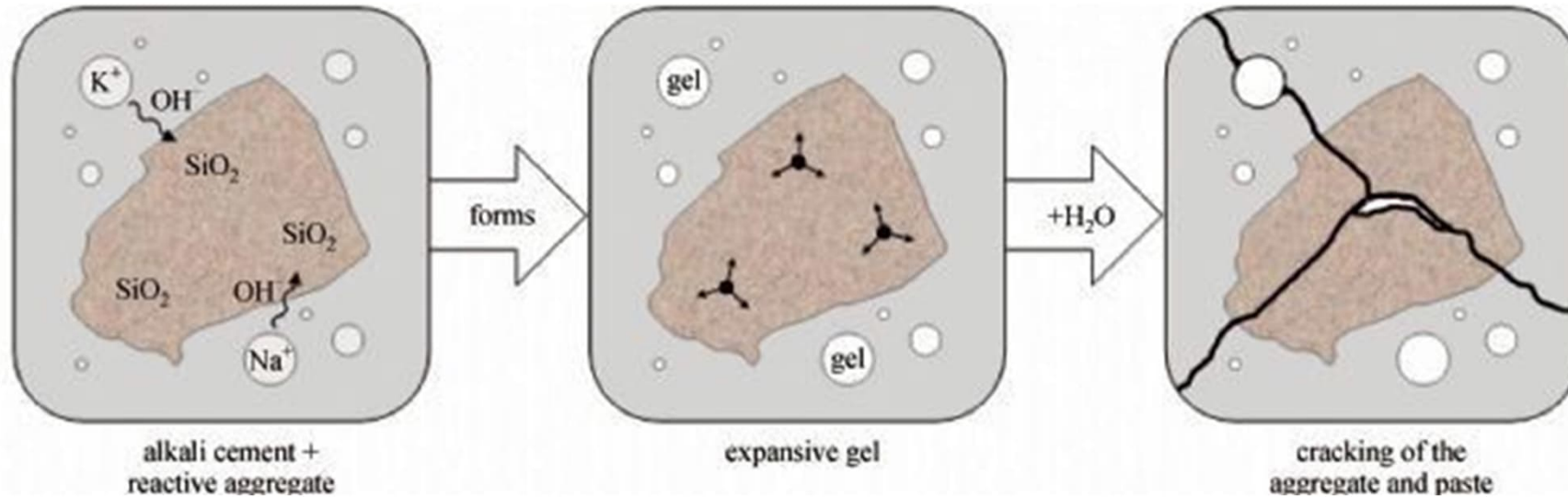
3. Vettä / kosteutta betonissa

- Betonin kosteus yli noin 80% RH
- Helpoin tapa pysäyttää AKR olemassa olevassa rakenteessa on pudottaa RH:n taso alle 80%
- Esimerkkinä uimahallit: allashuoneissa Suomessa AKR on todettu rakenteissa, jotka ovat jatkuvasti kosketuksissa veteen tai roiskealueella
- Allashuoneen korkea suhteellinen kosteus ei riitä AKR:n syntyyn

- Alkalikiviainesreaktio

- Alkalikiviainesreaktion mekaniikka

- Kemiallisen reaktion seurauksena muodostuu geeliä, joka imee itseensä runsaasti vettä ympäristöstään aiheuttaen voimakasta tilavuuden kasvua.
- Kun syntyneen geelin tilavuuden kasvusta johtuen betonin vetolujuus ylittyy, syntyy betonin halkeilua



Betonirakenteiden kemialliset vauriot – Hannu Pyy

- Alkalikiviainesreaktio

- Alkalikiviainesreaktion mekaniikka

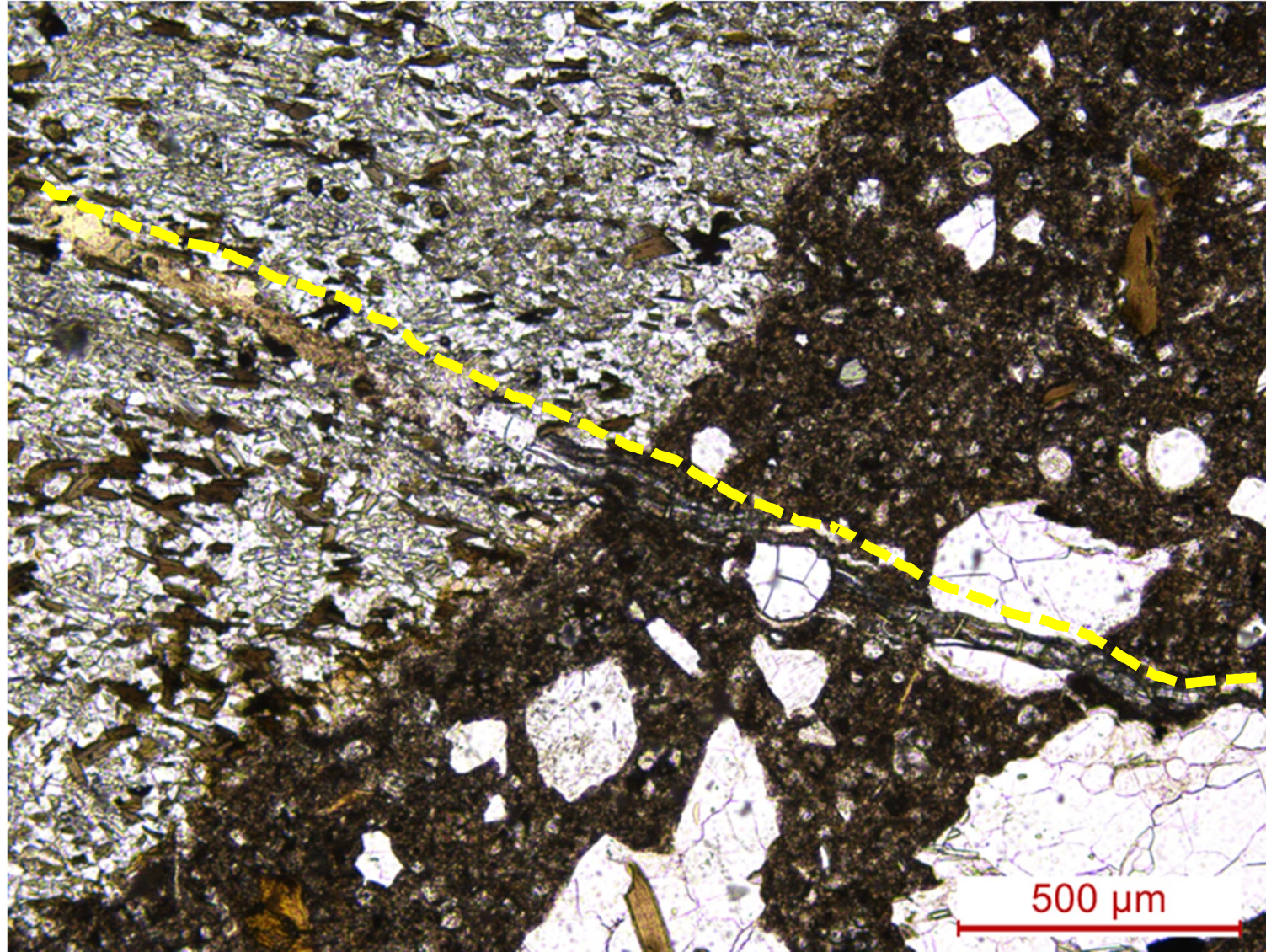
- Tilanne vatsaa teräskorroosion (paisuminen) synnyttämää halkeilua betonissa
- Eroaa pakkasrapautumisesta siinä, että pakkasvaurio on lähinnä betonin pintaosien vaurio, mutta **AKR voi esiintyä missä päin rakennetta hyvänsä**



- Alkalikiviainesreaktio
- Alkalikiviainesreaktion mekaniikka
- Voimakkaasti paisuvan geelinmuodostuksen seurauksena:
 - Betoniin syntyy jännityksiä
 - Halkeamia kiviainesrakeisiin, sementtikiveen ja tartuntoihin
 - Betonin mekaaniset ominaisuudet heikkenevät
 - Pinnalle yltävän halkeilun synty mahdollistaa veden pääsyn rakenteeseen >> pakkasvaurion riski kasvaa
 - Suolojen pääsy helpottuu >> teräskorroosion riski kasvaa
 - Betonin karbonatisoituminen nopeutuu halkeiluverkkoa pitkin

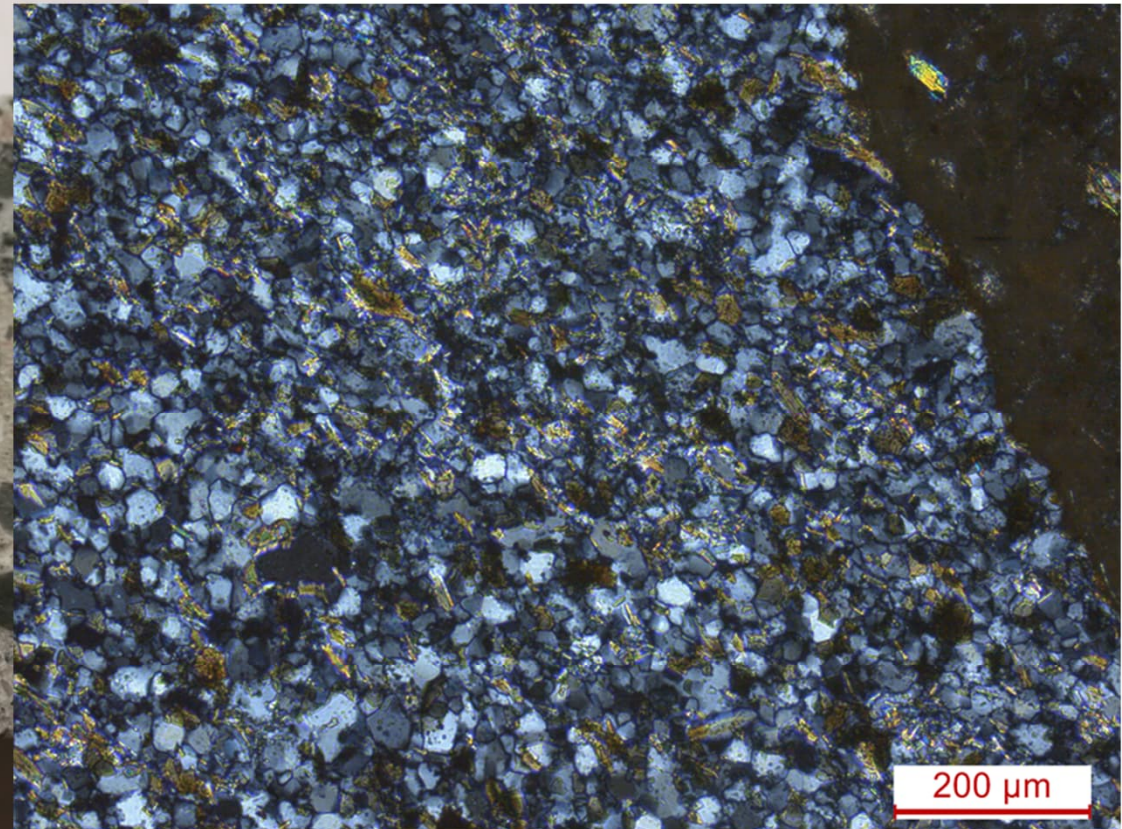
Betonirakenteiden kemialliset vauriot – Hannu Pyy

- Alkalikiviainesreaktio
- Esimerkkejä



Betonirakenteiden kemialliset vauriot – Hannu Pyy

- Alkalikiviainesreaktio
- Esimerkkejä: *hienorakeinen tumma liuske*

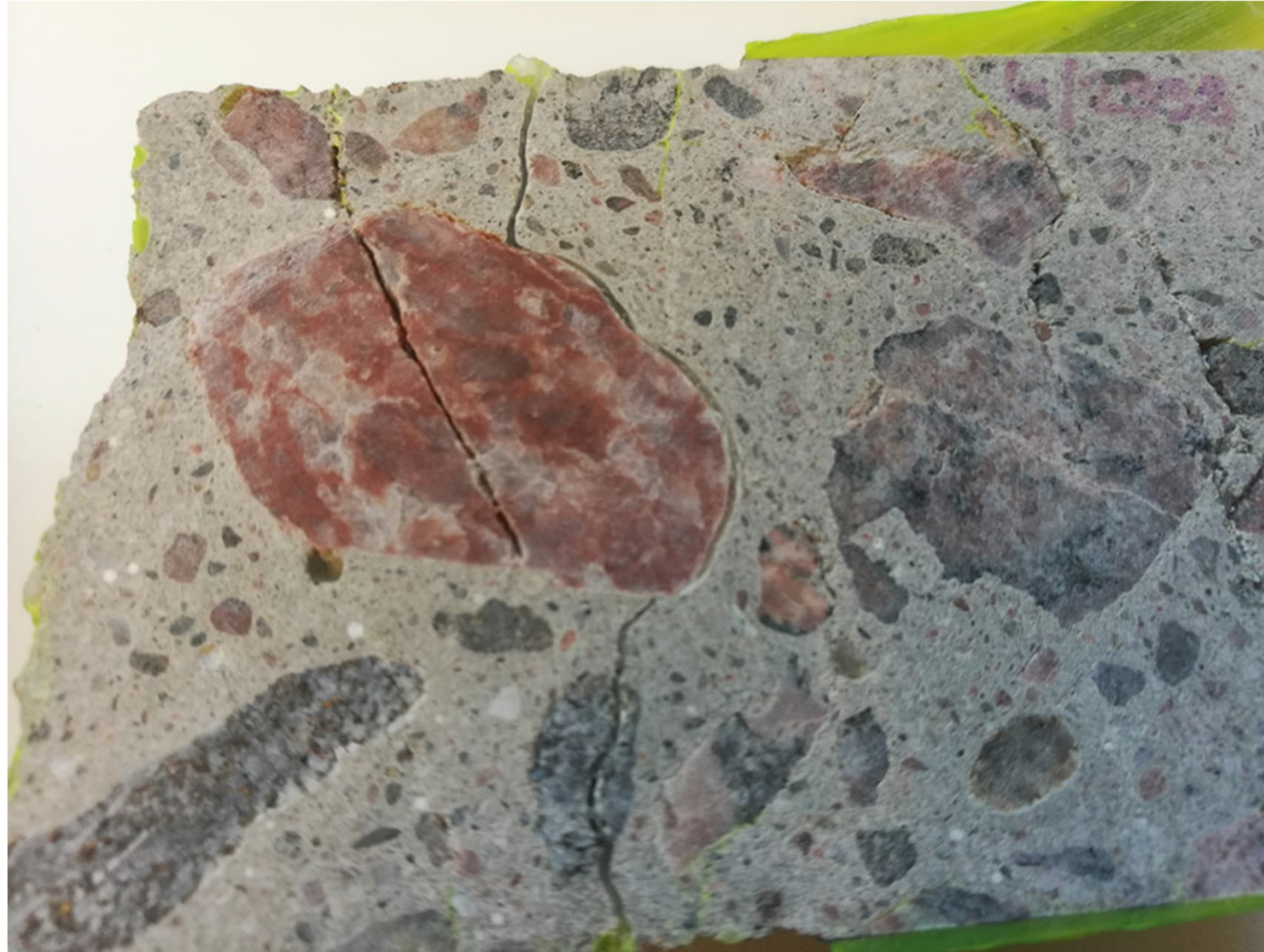


Betonirakenteiden kemialliset vauriot – Hannu Pyy

- Alkalikiviainesreaktio

- Esimerkkejä:

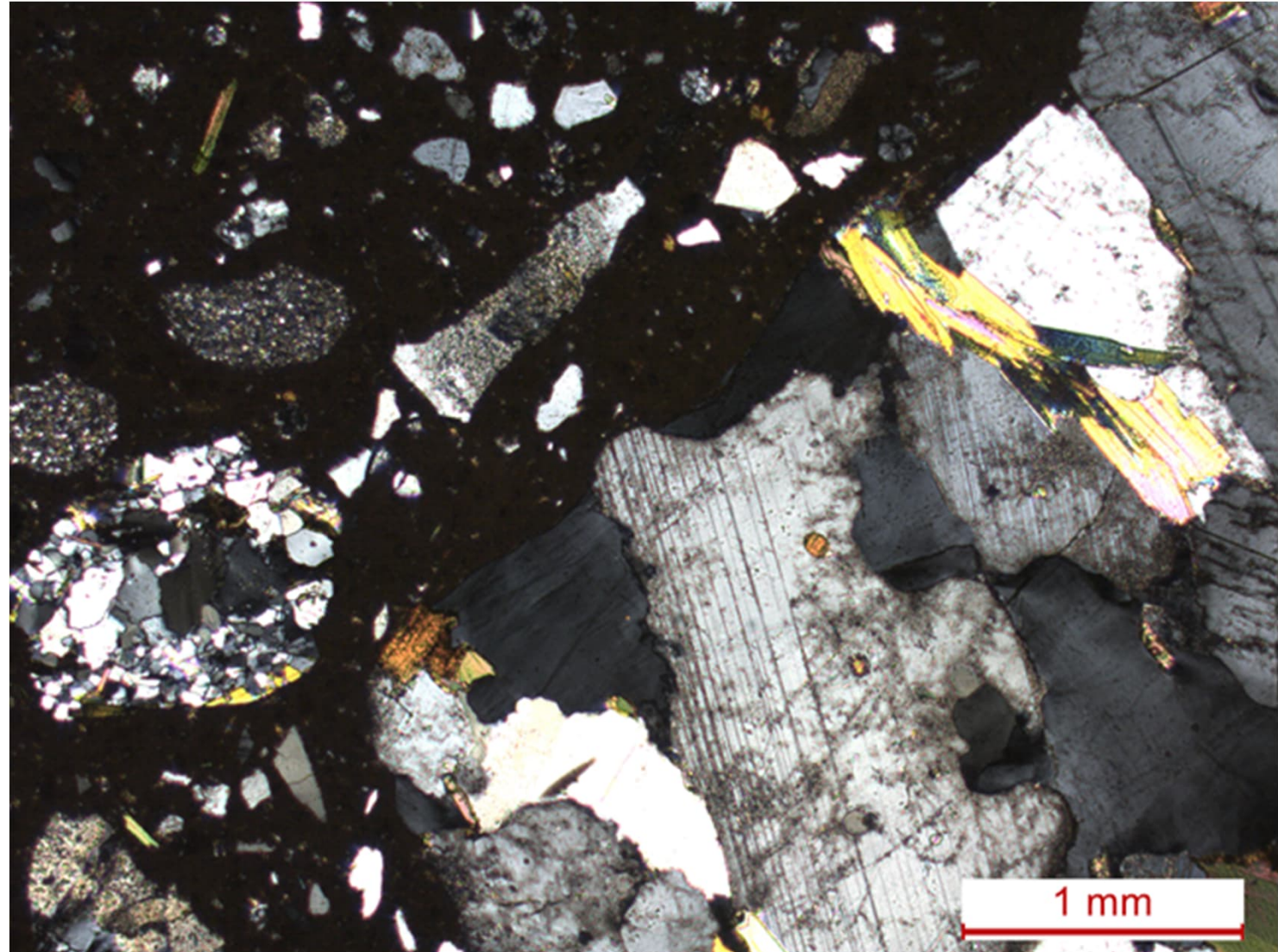
*Deformoitunut
graniitti*



Betonirakenteiden kemialliset vauriot – Hannu Pyy

- Alkalikiviainesreaktio

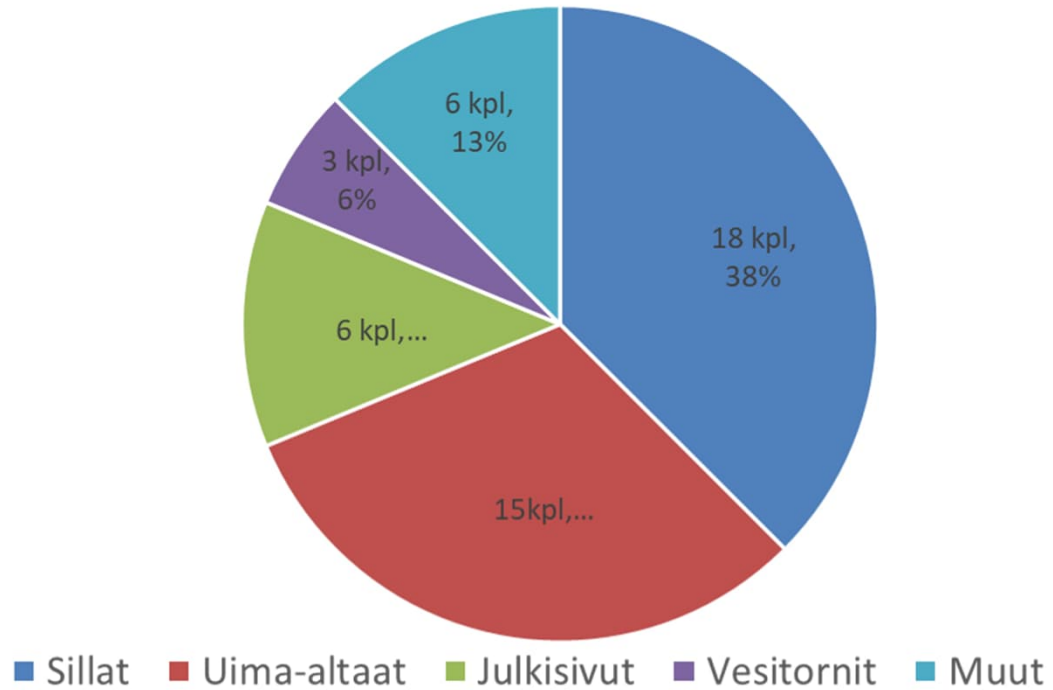
- Esimerkkejä:
*Eri raekoon kivien
Reaktiopotentiali
on erilainen*



Betonirakenteiden kemialliset vauriot – Hannu Pyy

- Alkalikiviainesreaktio
- Esiintyminen käytännössä

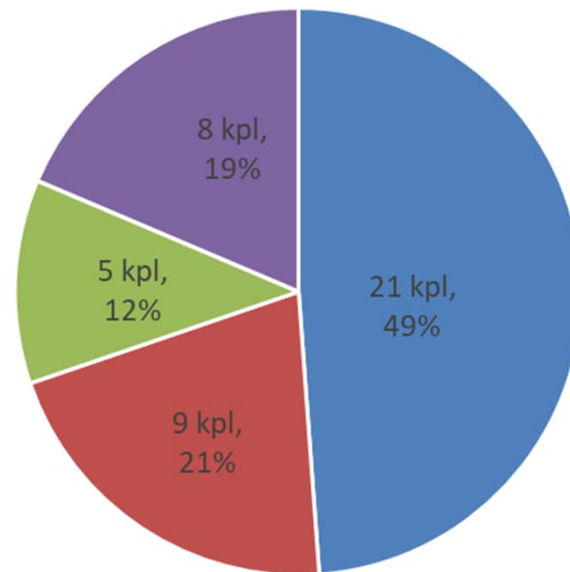
Vahanen Rakennusfysiikka Oy, AKR-kohteet 2011 - 2018, 48 kpl



Betonirakenteiden kemialliset vauriot – Hannu Pyy

- Alkalikiviainesreaktio
- Esiintyminen käytännössä

Vahanan Rakennusfysiikka Oy,
kivilajit 2011 - 2018 AKR-tapauksissa, 43 kpl



■ Tumma, hienorakeinen liuske
■ Deformoitunut graniitti

■ Kvartsipitoinen, hienorakeinen kivi
■ Muut kivilajit

- Alkalikiviainesreaktio
- Miten pysäyttää AKR olemassa olevassa rakenteessa
 - Kolme ehtoa reaktiolle >>> niihin vaikuttaminen
 - Kiviaines ? Alkalit? Kosteus (vesi) ?
 - Jos betonissa on reaktiivista kiviainesta, ei sitä sieltä pois saa = ei voi vaikuttaa
 - Jos betonissa on alkujaan ollut runsaasti alkaleita (sementistä), ei niitä sieltä pois saa ja käytön aikana betoniin on voinut kulkeutua alkaleita lisää = ei voi vaikuttaa
 - >>> se tekijä, johon voi vaikuttaa on betonin kosteustaso
 - Kosteustason lasku alle 80...85%RH
 - tai...AKR pysähtyy itsestään, kun reaktioehdot eivät täyty
 - Kaikki reaktiivinen kiviaines reagoanut, alkalit kuluneet reaktioon
 - Tätä ei aina ymmärretä

Betonirakenteiden kemialliset vauriot – Hannu Pyy

- Alkalikiviainesreaktio
- Euroopassa noin 20 valtiota, joissa on kansallinen ohjeistus
- Case Suomi: ensin kielletään ja sitten hyväksytään AKR (vrt. USA 1940-luku ja samoin monissa maissa)

by 43, Betonin kiviainekset, 2008

1.1 Johdanto:

”Näissä ohjeissa käsitellään ensisijaisesti suomalaista luonnon kiviainesta, joka on yleensä lujaa, kulutusta ja pakkasta kestävä **eikä sisällä** haitallisia aineita kuten suoloja tai **reaktiivisia kivilajeja**”

4.3 Alkalireaktiivisuus

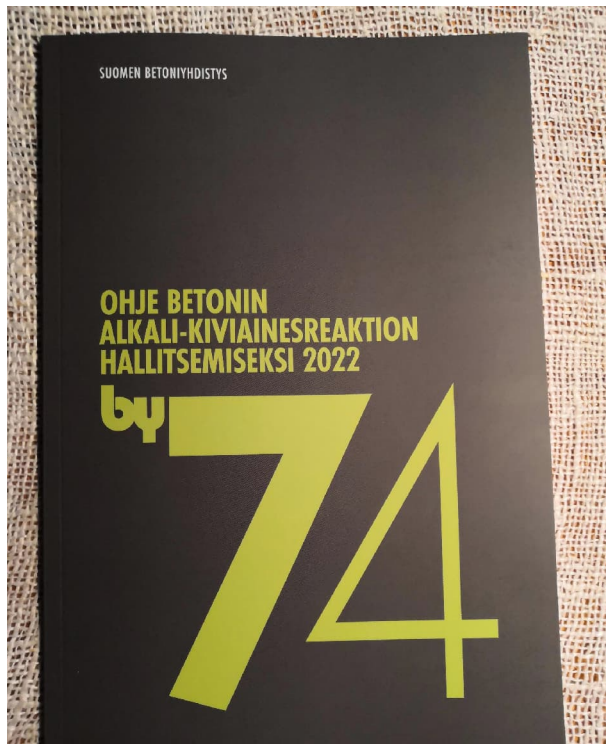
Nykytietämyksen perusteella ei alkalikiviainesreaktio suomalaisia kiviaineksia käytettäessä ole ongelma. Muissa pohjoismaissa on tietyillä alueilla kuitenkin löydetty alkalireaktiivisia.....

• by 43, Betonin kiviainekset, 2018

- **Alkalireaktiivisuudesta ja alkalikiviainesreaktiosta ajantasainen esitys ja reaktiokuvaus**
- s. 25 – 27 & 62 – 63

Betonirakenteiden kemialliset vauriot – Hannu Pyy

- Alkalikiviainesreaktio
- Ohjeistus, normit ja standardit
- Yleiseurooppalaista alkalireaktiivisuuden normia tai ohjetta ei ole, vaan jokaisella maalla on toistaiseksi omat norminsa
- Suomessa by 74: "Ohje betonin alkali-kiviainesreaktion hallitsemiseksi 2022"



BY 74 OHJE BETONIN ALKALI-KIVIAINESREAKTION HALLITSEMISEKSI 2022

Tässä ohjeessa käydään läpi alkali-kiviainesreaktiota ja sen vaikutusta betonirakenteiden säilyvyyteen. Lisäksi annetaan ohjeita alkali-kiviainesreaktion välttämiseen, kiviainesten reaktiivisuuden käsittelemiseen ja testaamiseen, betonirakenteiden turvalliseen toteutukseen reaktiivisen kiviaineksen kanssa sekä AKR:n tunnistamiseen ja reaktiosta kärsivien betonirakenteiden korjaamiseen.

Ohje on tarkoitettu ensisijaisesti betonirakenteita suunnitteleville rakennesuunnittelijoille. Lisäksi siinä on tärkeää tietoa kiviaines- ja valmisbetonitoimittajille, betonitutkimuslaboratorioille sekä petrografiaan ja kiviainestutkimuksiin perehtyneille geologeille.

- Alkalikiviainesreaktio
- By 74
- Vanhojen betonirakenteiden kuntotutkimuksissa AKR-vaurioasteen luokitus perustuu rakenteista tehtäviin ohuthietutkimuksiin ja niissä todettujen
 - reaktiivisten kiviainesten määrään sekä
 - alkali-kiviainesreaktioiden laatuun.
- Betoneiden AKR-vauriot voidaan luokitella kolmiportaiselle asteikolle V0...V2 ohuthietutkimusten perusteella
- AKR-luokitusta ei voi tehdä ilman ohuthietutkimusta

- Alkalikiviainesreaktio
- By 74
- Luokassa V0 alkali-kiviainesreaktiota ei ole tai se on heikko. Rakenteen käytettävyys on AKR:n osalta hyvä eikä vaadi toimenpiteitä
- Luokassa V1 alkali-kiviainesreaktio on lievä...kohtalainen. Rakenteen kuntoa tulee arvioida ja seurata sekä tehdä seurantatutkimuksia 5...10 vuoden kuluessa.
- Luokassa V2 alkali-kiviainesreaktio on voimakas. Rakenteen säilyvyys on mahdollisesti alentunut. Jos yksikin näytesarjan ohuthie luokitellaan luokkaan V2, edellyttää se toimenpiteitä, joita ovat tutkimussuunnitelma, lisänäytteenotto ja vaadittavat tutkimukset vuoden sisällä.

Betonirakenteiden kemialliset vauriot – Hannu Pyy

- Alkalikiviainesreaktio
- By 74
- Uusien betonirakenteiden kiviainesten alkali-kiviainesreaktiivisuus tulee luokitella (RILEMin ohjeen mukaisesti) joko petrografisen analyysin (AAR-1.1), kiihdytetyn laastiprismakokeen (AAR-2) tai betoniprismakokeen (AAR-3) perusteella.
- Luokittelussa edetään tyypillisesti vaiheittain. Testien tuloksen perusteella tutkittava kiviaines luokitellaan johonkin seuraavista luokista:
 - Luokka I – alkali-kiviainesreaktiivisuus erittäin epätodennäköinen.
 - Luokka II – alkali-kiviainesreaktiivisuus mahdollinen.
 - Luokka III – alkali-kiviainesreaktiivisuus todennäköinen.
- Jos kiviaines määräytyy petrografisen luokittelun perusteella luokkiin II tai III, voidaan tehdä laastiprismakoe AAR-2. Mikäli laastiprismakokeen AAR-2 tulos osoittaa edelleen alkali-kiviainesreaktiivisuusluokkaa II tai III, voidaan tehdä betoniprismakoe AAR-3. Reaktiivisuusluokitus tehdään aina viimeisimmän testituloksen perusteella.

Betonirakenteiden kemialliset vauriot – Hannu Pyy

- Tulipalo

- Betonin käyttäytyminen tulipalossa

- 20 – 30 asteessa huokosvesi poistuu
- 300 – 490 asteessa absorboitunut vesi poistuu
- 490 – 540 kalsiumhydroksidi hajoaa
- 573 astetta kvartsin kiderakenne muuttuu > kivirae paisuu > halkeilu
- 580 -750 astetta β -dikalsiumsilikaattia muodostuu

- Betonin väri eri lämpötiloissa:

- 0 – 300 ei muutosta
- 300 – 600 usein vaaleanpunainen
- 600 – 900 valkoisen harmaa



- Tulipalo

- Betonitutkimukset tulipalotapauksissa:

- Normaalit taustaselvitykset + rakenne- ja paloselvitykset
 - Tutkimukset kohteessa (silmämääräiset havainnot ja valokuvaus)
 - Näytteenotto ja laboratorioanalyysit, joita ovat termovaaka-analyysi, ohuthietutkimus ja mahdollisesti lujuuskokeet
 - Termoanalyysissä määritetään se lämpötila, jossa betoni on käynyt palon aikana
-
- Puristuslujuus / betonin palolämpötila
 - 85 % / 300 astetta
 - 70 % / 400 astetta
 - 50 % / 500 astetta
 - 40 % / 600 astetta
 - 20 % / 700 astetta

- Loppulentti

- Iso matala ryömintätila
- Yli 400 lyöntipaalua
- Paaluissa raportoitu halkeilua
- Korjaaminen mantteloimalla



- KIITOS

Hannu Pyy

Senior adviser, Tekn.lis.

AFRY Buildings Finland Oy

Rakennusfysiikka

Puh. 040 507 2071

hannu.pyy@afry.com

