Jäädytys-sulatusrasituksen vaikutus kloridien tunkeutumiseen betonissa

Miguel Ferreira, Hannele Kuosa, Markku Leivo ja David Lange
Teknologian tutkimuskeskus VTT

Avainsanat: jäädytys-sulatus, kloridit, betoni, säilyvyys, pakkasvaurioituminen, rapautuminen, toimintakyky

Johdanto

Tutkimuksessa betonin vaurioitumisesta jäädytys-sulatusilmiön vaikutuksesta on tehty useita edistysaskelia. Tästä huolimatta vaikutukset kloridien tunkeutumiseen betoniin ovat jääneet vähälle huomiolle. Jäädytys-sulatus vähentää suojabetonikerrosta pintarapautumisen johdosta (suolojen esiintyessä) ja muuttamalla betonin pinnan ja sisäisen rakenteen luonnetta halkeilemalla. Viimeaikaiset tutkimukset ovat osoittaneet synergisiä vaikutuksia jäädytys-sulatusrasituksen ja kloridien tunkeutumisen välillä (Leivo et al. 2011; Kuosa et al. 2014; Li 2009; Ferreira et al. 2013), mutta edistystä ei ole saavutettu ilmiöön liittyvien mekanismien kuvaamiseksi ja ymmärtämiseksi. Lisäksi vielä ei ymmärretä merkitystä betonisen infrastruktuurin säilyvyyteen ja käyttöikään. Tästä syystä käynnistettiin tutkimusprojekti kloridien betoniin tunkeutumisen vaikutusten selvittämiseksi. Tässä kaksi erilaista betonia altistettiin neljälle erilaiselle jäädytys-sulatus testisyklille ja kahdelle referenssiolosuhteelle. Tässä kirjoituksessa esitetään tutkimusprojektin alustavat tulokset.

Koeohjelma

Tutkimuksessa kaksi koostumukseltaan erilaista betonia altistettiin erilaisille jäädytys-sulatussykleille, joiden alhaisin lämpötila vaihteli (-5, -10 ja -20°C). Lisäksi betonit altistettiin kloridipitoiselle vedelle kahdessa vakiolämpötilassa (+5 ja +20°C)(referenssitestit). Betonit, joiden vesi-sementtisuhteet (w/c) olivat 0,42 ja 0,55 (B42 ja B55), valmistettiin käyttäen sementtiä CEM I 42.5 N-SR3. Tämä sementtityyppi valittiin mahdollisen kloridien sitoutumisen minimoimiseksi. Betonissa B42 käytettiin tehonotkistinta. Huokostinta käytettiin molemmissa betoneissa. Taulukossa 1 on esitetty perustiedot betonikoostumuksista, mitattu työstettävyys (painuma) ja kovettuneesta betonista määritetyt suojahuokostusta kuvaavat parametrit. Viitteessä Ferreira et al. (2014a) on esitetty tarkat koostumus- ja muut tiedot betoneista.

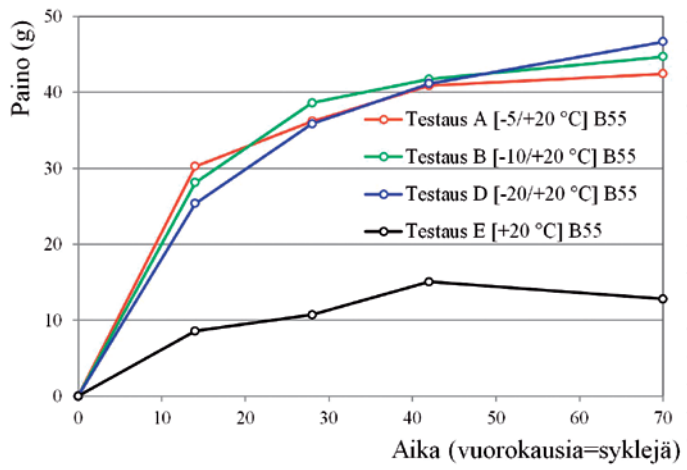
1 Silta NR24 (Lahti - Vääksy) Vääksyn kanavan yli. Viimeaikaiset tutkimukset ovat osoittaneet synergisiä vaikutuksia jäädytys-sulatusrasituksen ja kloridien tunkeutumisen välillä.

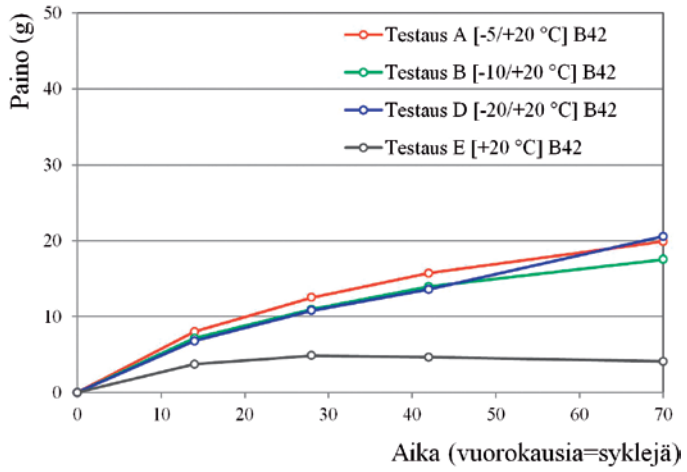
Taulukko 1 – Betonien koostumus, työstettävyys ja kovettuneen betonin ilmahuokosparametrit.

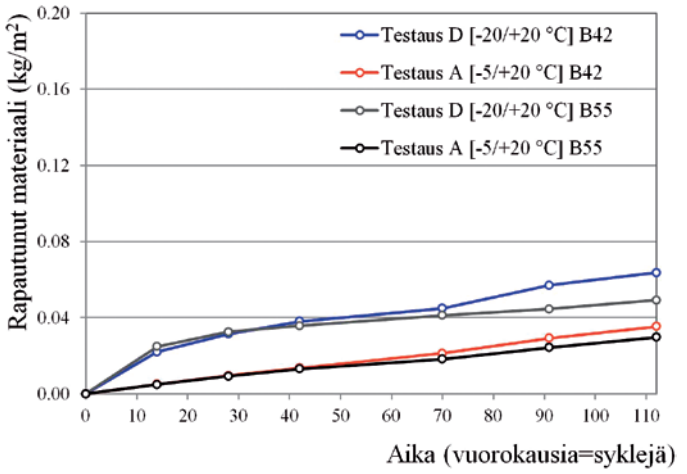
Betoni	w/c	Vesi (l/m³)	Sementti (kg/m³)	Kiviaines (kg/m³)	Painuma (mm)	Huokosjako (mm)	Ominais-pinta-ala (mm³/mm³)	Kokonais-ilmamäärä (%)	Suojahuokoset (%)
B42	0.42	175	420	1695	100	0.21	33	4.1	2.9
B55	0.55	195	355	1716	180	0.24	21	5.9	5.1

Artikkelin kuvat: VTT

1

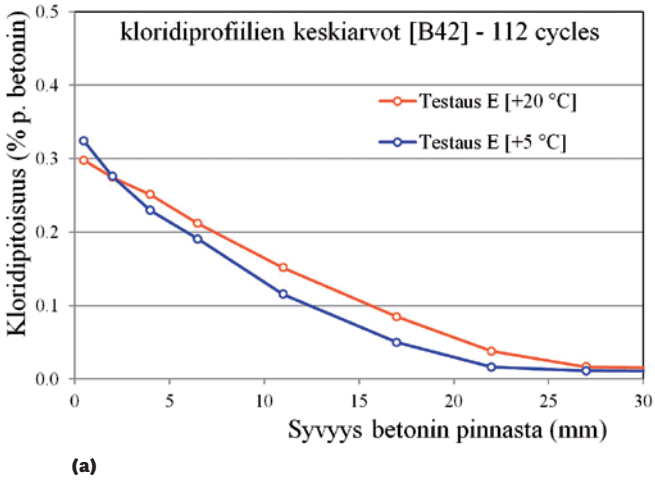




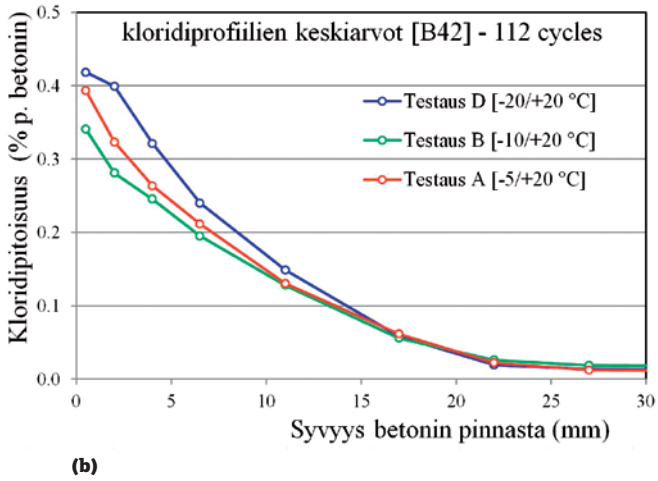


2 Keskimääräiset kloridiprofiilit 112 päivän jälkeen referenssitesteissä ja 112 jäädytys-sulatussyklien jälkeen B55 betonilla.

Betoneista valmistettiin 150 mm kuutioita, jotka tiivistettiin tärypöydällä. Muotit purettiin betonin 1 vrk iässä ja kuutiot siirrettiin kosteushuoneeseen RH ≥95 % (+20±2°C), jossa niitä säilytettiin testauksen aloittamiseen asti. Molemmissa betoneissa oli hyvä suojahuokostus, kuten taulukossa 1 esitetyt pienet suojahuokosten huokosjaot ja riittävän suuret ominaispinta-alat osoittavat. Koekuutioita säilytettiin kosteushuoneessa noin kahdeksan kuukauden ajan, jotta myöhemmin itse testauksen aikana tapahtuvat sementin hydrataatiosta johtuvat mikrorakenteen muutokset voitiin minimoida. Tämän jälkeen betonikuutiot siirrettiin kosteushuoneeseen RH 65 % (+20±2°C) vielä kuukauden ajaksi. Kymmenen päivää ennen jäädytys-sulatustestauksen aloittamista valmistettiin standardissa CEN/TS 12390-9 esitetyn menetelmän mukaisesti koekappaleet testausta varten. Kolme päivää ennen testausta koekappaleet altistettiin ionivaihdetulle vedelle (3 mm kerros pinnalle). Testauksen alussa tämä vesi vaihdettiin 3 p.-% NaCl-liuokseen. Tutkimuksessa käytettiin kolmea erilaista jäädytys-sulatussykliä, jotka noudattivat pakkas-suolatestauksen referenssitestin lämpötilakäyrää (CEN/TS 12390-9). Syklien alimmat lämpötilat olivat -5, -10 tai -20°C. Kaikkiaan koekappaleet altistettiin 112 jäädytys-sulatussyklille. Jäädytys-sulatussykleihin valittiin toisistaan poikkeavat alimmat lämpötilat, jotta suolaliuos betonin huokosrakenteessa altistuisi erilaisille jäätymis-sulamistapahtumille. Mitä alemmas lämpötila laskee, ja mitä pidempään jäätyminen kestää, sitä suurempi osuus huokosrakenteessa olevasta liuoksesta jäätyy (Ferreira et al. 2013). Vertailutestauksessa koekappaleiden



(a)



(b)

3 Keskimääräiset kloridiprofiilit 112 päivän jälkeen referenssitesteissä (a) ja 112 jäädytys-sulatussyklien jälkeen (b) B42 betonilla.

päällä oli suolaliuosta vakiolämpötiloissa +5°C ja +20°C. Jäädytys-sulatustestauksen aikana seurattiin rapautuneen betonin määrää (kg/m²) sekä koekappaleiden painonmuutosta ja ominaisfrekvenssiä. Lisäksi tiettyinä ajankohtina koekappaleita poistettiin testauksesta ja niiden kloridiprofiilit määritettiin. Viitteessä Ferreira et al. (2014b) on esitetty koejärjestelyiden yksityiskohdat ja koetulokset.

Tulokset ja keskustelu

Kuvat 2 ja 3 esittävät keskimääräiset kloridiprofiilit B42 ja B55 betonille 112 päivän jälkeen referenssikokeissa ja jäädytys-sulatuskokeissa. Viitteessä Ferreira et al. (2014b) on esitetty yksityiskohtaiset tulokset mittauksista.

Pääasialliset testausten aikaiset veden ja kloridien tunkeutumismekanismit ovat kapillaari-ilmiö (ensimmäisten päivien aikana), diffuusio (vesihöyry; liuoksen kloridit) sekä jäätymis-sulamissyklien aiheuttama pumppausmekanismi.

Suhteellinen dynaaminen kimmomoduuli (RDM) mitattiin käyttämällä ominaisfrekvenssiä. 112 jäädytys-sulatussyklin jälkeen kaikissa jäädytys-sulatustesteissä RDM olivat suurempia kuin 99.5%, mikä osoittaa, että sisäistä varioitumista ei tapahdu betonissa. Tämä oli odotettua hyvän huokostamisen perusteella.

Jäädytys-sulatussykleille altistuneista koekappaleista määritettiin suurempia vedenimuja kuin kappaleista, jotka oli altistettu vain liuokselle. Tämä viittaa siihen, että jäätymisen aikana muodostuvat mikrojäälinssit voivat voimistaa vedenimua. Jäädytys-sulatussykleille altistetuissa betoneissa vedenimu oli keskimäärin kolme kertaa suurempi (painon mukaan) kuin betonissa, joka oli altistettu pelkästään liuokselle +20°C. Selvää eroa vedenimussa ei havaittu eri lämpötiloissa tehdyissä jäädytys-sulatustesteissä. Tämä viittaa siihen, että jäädytys-sulatussyklin intensiteetti (alhaisin lämpötila) ei vaikuta merkitsevästi vedenimuun sykleissä käytetyillä intensiteeteillä (-5, -10 ja -20°C) ja kestoilla.

Referenssiolosuhteissa olleista koekappaleista määritetyt kloridiprofiilit osoittavat oletetun eron betonilaatujen välillä – B55 betonissa kloridipitoisuudet olivat syvemmällä betonissa suurempia kuin B42 betonissa. Profiilit eri jäädytys-sulatustesteistä olleista koekappaleista osoittavat, että testeissä saavutetun alhaisimman lämpötilan vaikutus on pieni tai merkityksetön. Kuitenkin nämä profiilit osoittavat eroavuuksia verrattuna referenssiolosuhteiden profiileihin. Tämä on odottamaton löydös, mutta voi olla ymmärrettävä, koska vedenimu on suurempi

4 Koekappaleet valmiina jäädytys-sulatustestaukseen, jossa niiden pinnalla on suolaliuos.

5 Betonikoekappaleita olosuhdehuoneessa RH 65 % ennen testauksiin valmistelua ja testausten aloittamista.

jäädytys-sulatuksen läpikäyneessä betonissa kuin referenssiolosuhteita kuvaavassa betonissa. Toisaalta ajatellaan, että tämä vedenimu on pääasiassa suolatonta, koska se tapahtuu jäälinssien pumppausvaikutuksesta mahdollisesti laimentamalla kloridiliuoksen pitoisuutta. Kuitenkin profiilit eivät osoita sellaista vähenemistä kloridipitoisuuksissa. Tämä viittaa siihen, että vuorovaikutus kilpailevien siirtymismekanismien välillä on monimutkainen eikä yksi ainut mekanismi selitä löytöjä, vaan mekanismien nykyinen vuorovaikutus näkyy profiileissa suurempina pintakerrosten kloridipitoisuuksina kuin referenssikappaleiden pitoisuuksissa.

Johtopäätökset

Testaus suunniteltiin useiden siirtymismekanismien vuorovaikutusten esille saamiseksi. Monimutkaisissa kokeissa yhdistyy kapillaarinen vedenimu samanaikaisesti vaikuttavaan diffuusioon ja jäädytys-sulatussyklit vaikuttavat näihin molempiin mekanismeihin. Tulokset antavat tietoa mahdollisista yhteisvaikutuksista, ja siksi on tärkeää kiinnittää huomiota todennettujen käyttäytymisten lopputuloksiin. Lopullisia johtopäätöksiä voi olla vaikea vetää ilman lisätutkimuksia. Rajallistenkin kokeiden ja koekappalemäärien perusteella on kuitenkin selvää, että

- Jäätymis-sulamiskoe altistaa betonin suuremmalle vedenimulle kuin vakiolämpötilassa toteutetut referenssikokeet. Tämä viittaa siihen, että pumppausefekti vaikuttaa vedenimuun. Vedenimu betonille B52 on suurempi betonille B42, kuten oli odotettua betonin huokosrakenteen perusteella;
- Selvää eroa ei havaittu vedenimussa intensiteetiltään eri jäätymis-sulatussykleissä (alhaisin lämpötila). Pumppausilmiö näytti olevan samansuuruinen -5, -10 ja -20°C sykleillä;
- Betonin B55 kloridiprofiilin suurus ja syvyys oli suurempi kuin B42 profiilin, kuten betonin huokosrakenteen perusteella oli odotettua;
- Jäätymis-sulamissyklien vaikutus kloridiprofiiliin on pieni mutta havaittavissa. Siirtymismekanismien välinen vuorovaikutus on monimutkainen ilmiö ja mikään yksittäinen siirtymismekanismi ei selitä kaikkea.
- Mielenkiintoista oli, etteivät betonien erilaiset jäädyttämiset ("pakastamiset") hidastaneet kloridien tunkeutumista tässä koesarjassa. Suuruusluokaltaan kloridien tunkeutumiset olivat samaa luokkaa riippumatta käsittelyistä. Vaikka jäässä kloridin tunkeutuminen on varmasti hidasta, näyttivät muut mekanismit kompensoineen tämän vaikutuksen pois. Jos tämä pitää suurin piirtein paikkaansa muissakin tapauksissa, se on hyvä, koska voimme jatkossakin kohtuullisen turvallisesti käyttää kloridien tunkeutumisen arviointiin arvoja, jotka mitataan normaaleissa laboratoriolämpötiloissa n. +20°C.

Kiitokset

Tätä tutkimusta rahoitettiin TEKES FiDIPro Ohjelmassa projektissa CSLA – Concrete Service Life Assessment: modelling frost attack degradation in the presence of chlorides (TEKES-40083/12).

6

Kirjallisuusviitteet

- Leivo, M., Sistonen, E., Al-Neshawy, F., Piironen, J., Kuosa, H., Holt, E., Koskinen, R., Nordqvist, C., 'Effect of interacted deterioration parameters on service life of concrete structures in cold environments. Laboratory results 2009 -2010'. VTT Research Report. VTT-R-04799-11, 2011. 57 p.
- Kuosa, H., Ferreira, R.M., Holt, E., Leivo, M., Vesikari, E., 'Effect of coupled deterioration by freeze–thaw, carbonation and chlorides on concrete service life. ' Cement.& Concrete Composites. 47 (2014) 32–40.
- Li, B., 'Chloride transport in concrete under frost action – An experimental study'. Master Thesis. TCH. Göteborg. 2009, 156 p.
- Ferreira, R.M., Kuosa, H., Makkonen, L., 'Performance & Durability of Concrete in Extreme Cold Environment. CSLA Project – Task 1. Literature Review'. VTT Research Report. VTT-R-073643-12. (2012). 108 p.
- Ferreira, R.M., Kuosa, H., Leivo, M., 'Characterization of testing concrete. CSLA Project – Task 5. Testing'. VTT Research Report. VTT-R-01620-14 (2014a).
- Ferreira, R.M., Kuosa, H., Leivo, M., 'Study of the effect of freeze-thaw on chloride ingress. CSLA Project – Task 6. Test setup and results'. VTT Research Report. VTT-R-01621-14 (2014b).

Effect of freeze-thaw stress on chloride penetration in concrete

VTT Technical Research Centre of Finland implemented a research project to study the effects of chloride penetration in concrete. Two different grades of concrete were exposed to four different freeze-thaw test cycles and two reference conditions. The results provide information about any joint effects and it is therefore important to pay attention to the end results of the verified performances.

More studies will probably be needed before any final conclusions can be drawn. However, it is clear that the freeze-thaw test exposes concrete to higher water suction than the reference tests carried out at a constant temperature. This suggests a correlation between the pumping effect and water suction. No clear difference was found in water suction between freeze-thaw cycles of different intensities. The effect of freeze-thaw cycles on the chloride profile is small, but detectable. Different freezing types did not slow down chloride penetration. The degree of chloride penetration was more or less the same regardless of the treatment.

It is possible also in the future to safely apply to chloride penetration estimates values measured at normal ca. +20°C laboratory temperatures.

6 Kemijoen ylittävä Jätkänkynttilä-silta Rovaniemellä.