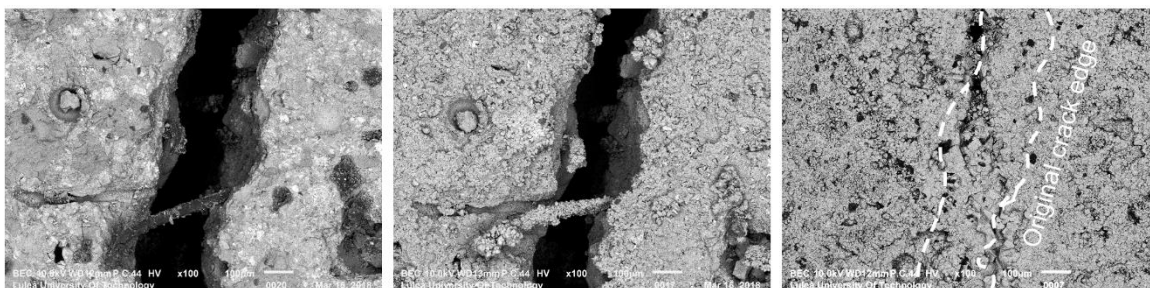


SJÄLVVLÄKANDE BETONG MED MILJÖVÄNLIGT BINDEMEDEL FÖR HÅLLBARA BETONGKONSTRUKTIONER



**Magdalena Rajczakowska, Andrzej Cwirzen,
Hans Hedlund, Karin Habermehl-Cwirzen**
2020-02-15

FÖRORD

Denna slutrapport sammanfattar resultaten från projektet *Självläkande betong med miljövänligt bindemedel för hållbara betongkonstruktioner*.

Forskningen genomfördes som ett licenciatarbete hos forskningsgruppen Byggmaterial, Luleå Tekniska Universitetet, av doktorand Magdalena Rajczakowska. Huvudhandledare var professor Andrzej Cwirzen. Assisterande handledare var prof. Hans Hedlund och dr Karin Habermehl-Cwirzen.

Projektet hade ekonomisk stöd från Trafikverket, Byggnadsindustrins utvecklingsfond (SBUF) och Skanska.

Vi vill också rikta en stort tack till prof. Mats Emborg (LTU) samt Katja Fridh och Magnus Åhs från Lunds universitet för alla produktiva diskussioner.

Sist men inte minst vill vi tacka Referensgruppen: Lic. Mikael Westerholm (Cementa), Dr Arvid Hejll (Trafikverket) och Dr Holger Ecke (Vattenfall) för värdefulla kommentarer.

2020-02-15

SAMMANFATTNING

Betong är ett sprött material som är benäget att spricka på grund av dess låga draghållfasthet. Sprickreparationer är inte bara dyra och tidskrävande utan ökar också koldioxidutsläpp. Att designa ett nytt betongmaterial som har förmågan att självreparera sprickor skulle förbättras dess hållbarhet. Självhelande eller självläkande kan definieras som materialets förmåga att reparera inre skador utan ett extern ingripande. När det gäller betong kan processen vara så kallad autogen, baserad på en optimerad blandningskomposition, eller så kallad autonom, när kapslar som innehåller läkemedels- och / eller bakteriesporer blandas i bindemedelsmatrisen. Den första processen använder icke-hydratiserade cementpartiklar än helandet materialet medan den andra processen använder ett syntetiskt material eller bakterier som faller ut kalcit som släpps ut i sprickan från en kapsel som gick sönder eller aktiveras genom tillgång till vatten och syre. De huvudsakliga nackdelarna med den autonoma metoden är försämring av bearbetbarheten av den färsk betongen, försämrade mekaniska egenskaper, låg effektivitet, låg överlevnad av kapslarna och bakterierna under blandning och ett mycket höga priset. På andra sidan känns den autogena självläkningen vara mer effektiv, mer kostnadseffektiv, säkrare och lättare att implementera i fullskaliga applikationer. Kunskaper relaterad till mekanismer och nyckelfaktorer som styr den autogena självläkningen är ganska begränsad. Syftet med detta forskningsarbete var att förstå bättre den autogena självläkande processen av betong och att optimera blandningsdesignen och exponeringsförhållandena för att maximera självhelande processseffektivitet.

Flera faktorer som påverkade den autogen självläknings process studerades, inklusive mängden av icke-hydratiserad cement, blandningskomposition, materialålder, självläkande varaktighet och exponeringsförhållanden. Processen undersöktes både externt, vid ytan och djupare inuti sprickan genom att utvärdera sprickstängningen och kemisk sammansättning av bildade självläkande produkter. Dessutom studerades återhämtningen av böjstyrkan. Det observerades att en stor mängd cement i betongblandningen inte säkerställa en effektiv autogen självläkning av sprickor. En mycket tät porstruktur begränsade transporten av kalcium- och silikonjoner till sprickan och minskade nederbörden av läkningsprodukterna. Tillsatsen av flygaska ökade sprickförlutningsförhållandet nära sprickmunnen, men dess närvaro stödde inte återhämtningen av böjhållfastheten, förmodligen på grund av en mycket begränsad bildning av bärande fasar inuti sprickan. Kalciumkarbonat detekterades huvudsakligen vid sprickmunnen, medan kalciumsilikathydrat (C-S-H) och ettringit hittades djupare insprickan. Bildningen av C-S-H och ettringit resulterade förmodligen i en återskapande av böjhållfastheten. Dessutom observerades att kalcitkristaller bildades, nära ytan på provkroppens miljöbelastade sida, inuti sprickan genom dess yttre förslutning. En läkningprocess baserad på rent vatten tycktes vara otillräcklig även vid applicering av olika temperaturcykler och vattenvolymer. Applicering av ett fosfatbaserad retarderande tillsatsmedel i blandningsbvattnet resulterade i hög självläkande effektivitet. Tillsats av ett fosfatbaserat tillsatsmedel hämmade förmodligen bildningen av ett tätt hydratiseringsskal på ytan av de icke-hydratiserade cementkornen och främjade därmed utfällningen av kalciumfosfatföreningar inuti sprickan.

INNEHÅLL

1. BAKGRUND	4
2. FORSKNINGSPROGRAM.....	4
3. RESULTAT	4
3.1. BLANDA SAMMANSÄTTNING OCH BETONG ÅLDER	4
3.2. EXPONERINGSFÖRHÅLLANDEN	6
4. SLUTSATSER	9
BILAGA 1	11

1. BAKGRUND

Betong är det mest använda byggmaterialet. Bindemedel som används för betongproduktion är främst vanlig Portlandcement (OPC). Under de senaste åren har den årliga produktionen av cement i världen nått cirka 1,7 miljarder ton (Yang et al 2015, Gartner, 2004). Samtidigt beräknades det att den globala produktionen av OPC bidrar till utsläpp av så mycket som 7% av den totala globala CO₂. För en hållbar utveckling erfordras en fortsatt utveckling av miljövänliga bindemedel med lägre koldioxidbelastning.

Dessutom uppvisar betong sprött beteende och mycket begränsad draghållfasthet, vilket medför att betong lätt tenderar att spricka och därigenom lättare tillåter att joner når armeringen och kan påskynda armeringskorrosion samt nedbrytningen av betongens mikrostruktur. Sprickbildning i en betongkonstruktion påskyndar nedbrytningsmekanismerna, vilket leder till en kortare teknisk livslängd och högre underhållskostnader för att vidmakthålla konstruktionens funktion. En betongksammansättning som har förmågan att självläka sprickor och återskapa mekaniska egenskaper är ett vetenskapligt mål för många forskare. Genom en materialutveckling kan såväl en sänkning av reparationskostnaderna vara möjliga som att bidra till att minska koldioxidbelastning, dvs en hållbar utveckling.

Det finns två typer av självläkande processer i cementbaserade kompositer, dvs. autogena och autonoma. Den autogena självläkningen innehåller endast de vanligt förekommande delmaterialen i en betongsammansättning och som främjar sprickreparationen på grund av deras specifika kemiska sammansättning och under gynnsamma miljöförhållanden (De Rooij et al. 2013). Den autonoma självläkningen externa komponenter, såsom mikrokapslar eller bakterier för att underlätta reparationsprocessen av en skada (t.ex. Jonkers 2007).

Den autogena självläkningens metoderna som baserar på traditionell betongteknologi befunns att vara billigare, enklare och säkrare än autonoma metoder. Därför verkar den autogena självläkningen att vara en betydligt mer genomförbar lösning för praktiska tillämpningar. Detta forskningsprojekt har fokuserat på utvecklingen av en effektiv autogen självläkande strategi.

2. FORSKNINGSPROGRAM

Forskningsprogrammet bestod av en experimentell verifiering av effekterna av olika parametrar på självläkningens processens effektivitet; relaterade till både blandningssammansättningen av betong och de självhållande exponeringsförhållandena. Både intern och extern sprickstängning undersöktes med fokus på den rumsliga fördelningen och den kemiska sammansättningen av de helande produkterna som bildades inuti sprickan. Digitalt optiskt mikroskop (extern sprickstängning) och Scanning Electron Microscope (Extern och intern sprickstängning) användes. Dessutom mättes upprepningen av de mekaniska egenskaperna som en viktig parameter med avseende på möjliga framtida verkliga användningar. Trepunkts böjningstest används för verifiering av hur väl mekaniska egenskaper återskapats. Baserat på de erhållna resultaten föreslogs en mekanism för autogen självläkning för testade förutsättningar.

Två huvudexperiment genomfördes. Experiment 1) syftade till att verifiera den grundläggande allmänt accepterade hypotesen beträffande förhållandet mellan den självläkande effektiviteten och mängden tillgängligt icke-hydratiserat cement. Detta uppnåddes genom att testa Ultra Hög Presterande Betong (UHPB), som är ett exempel på en blandningskomposition med ett extremt högt cement innehåll. Dessutom analyserades effekten av följande faktorer; typ av cement (med och utan flyg aska), blandningskompositioner (UHPB och Hög Presterande cementbruk) och provens ålder (1-dag vs 12 månader). Resultat av detta undersökningarmöjliggjorde formuleringen av den initiala hypotesen som beskrev den självläkande mekanismen. Experiment 2) fokuserade på en grupp nyckelfaktorer som bestämdes i experiment 1. I denna del av forskningen provades självläkningen för ett cementbaserat bruk vid 12 olika miljöförhållanden.

3. RESULTAT

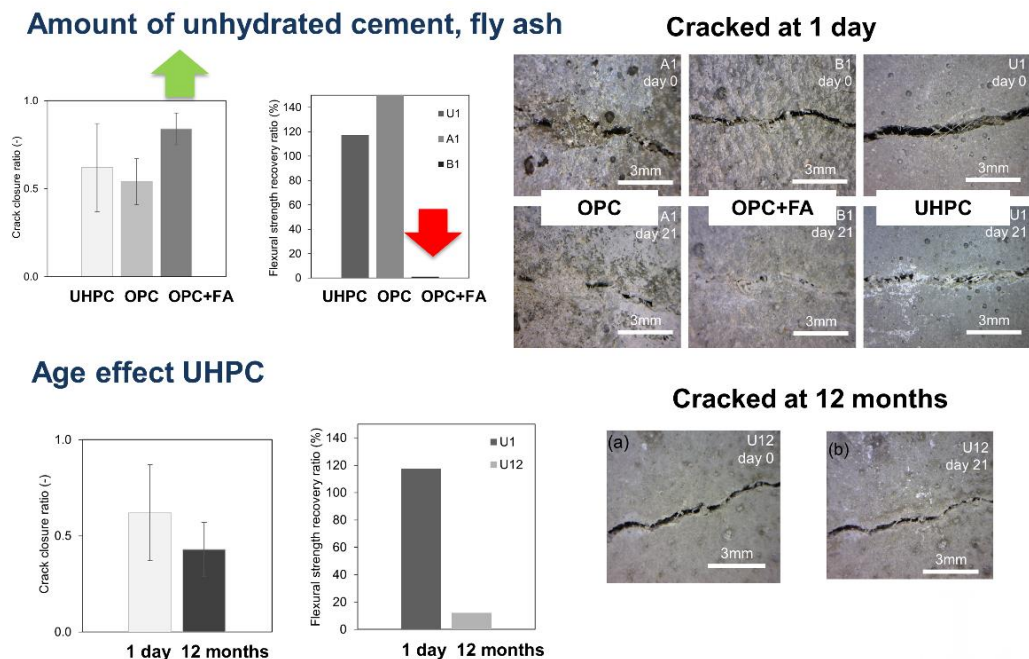
3.1. Blanda sammansättning och betong ålder

Blandningskompositionen är en styrande faktor när det gäller effektiviteten i den autogena självläkande processen. En vanlig accepterad hypotes säger att läkningen är mer effektiv för blandningar som har en hög mängd icke-hydratiserat bindemedel tillgängligt. Detta skulle gynna blandningar med ett lågt förhållande mellan vatten och cement och hög mängd av cement. Resultaten

som erhållits i denna studie visade emellertid att en stor mängd cement, såsom i fallet med Ultra Hög Presterande Betong (UHPC), inte säkerställer en effektiv autogen självläkning av sprickor. Betydligt högre sprickstängningar observerades för rent cementbruk (CEM I / OPC) och cementbruk innehållande flygaska (Figur 1).

I motsats till resultaten för styrka upprepning observerades den bästa synliga självläkningen (figur 1) såväl som det högsta sprickförslutningsförhållandet (figur 1) i fallet med blandningen B1, som innehöll flygaska (OPC + FA). I prov B1 bildades huvudsakligen kalciumkarbonat i sprickan. Ingen återuppbyggnad av den mekanisk styrka observerades vid böjprovningen, vilket antyder på att trots ett mycket god sprickförslutningsgrad återskapades endast en mycket begränsad mängd C-S-H gel utvecklade inuti sprickan.

PVA-fibrerna stödde bildning av helande faser genom att skapa kärnbildningsställen på grund av deras hydrofila natur.



Figur 1. Sammanfattning av resultaten från Experiment 1 – effekt av sammansättning och ålder (modifierad från Rajczakowska et al, 2019b.).

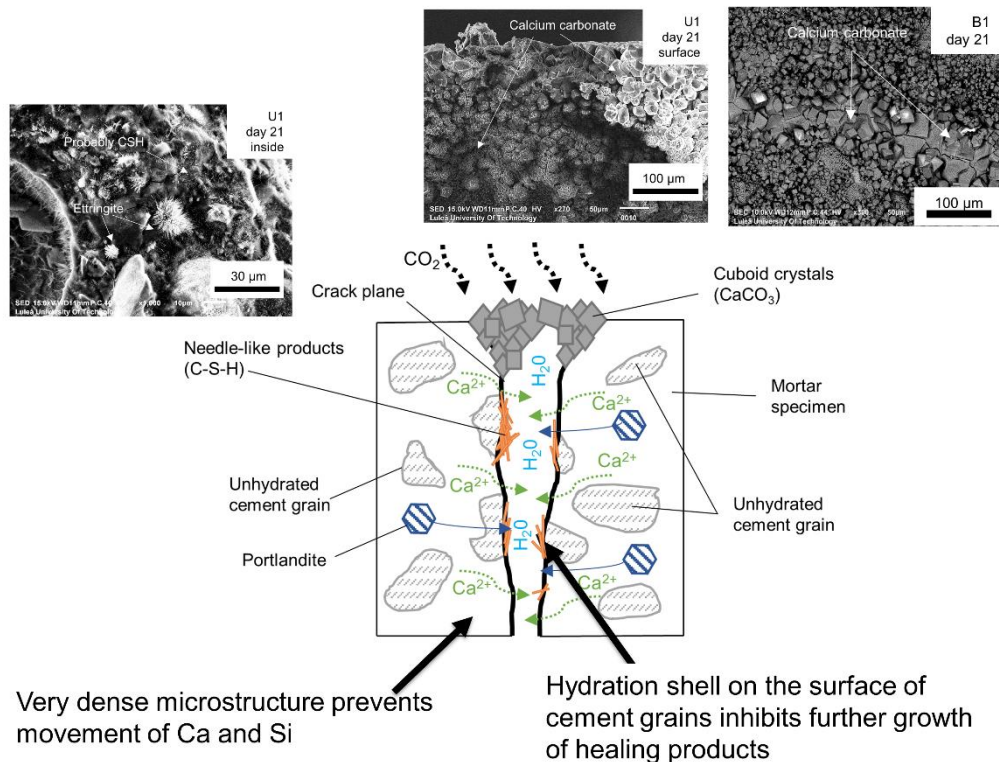
Resultaten från experiment 1 avslöjade att sprickstängningen var signifikant mindre för det åldrade UHPB-provet (U12) än för det 1 dag gamla provet (U1) som innehöll mer sammankopplade porer. Detta visar att porositeten hos bindemedelsmatrisen, och i synnerhet mängden sammankopplade porer har en avgörande roll i den självläkande processen. Tillväxthastigheten för hydratiseringsprodukterna inuti den läktade sprickan beror främst på koncentrationen av kalcium- och silikonjoner. Därför påverkar permeabiliteten av bindemedelsmatrisen transporten av dessa joner till sprickan. En tät, mindre porös cementmatris, som till exempel för äldre UHPB, kommer att hindra den självläkande processen. Resultaten av experiment 1 indikerar på ett specifikt mönster för självläkningsprocessen som visas i figur 2.

Den utförda preliminära studien avslöjade flera grundläggande olösta problem relaterade till mekanismen för den autogena självläkande. Eftersom UHPB:s självhållningseffektivitet var relativt låg, verkar det som om tillgängligheten av ickehydratiserat cement inuti sprickan spelar en sekundär roll i självhållningsmekanismen och garanterar inte en tillfredsställande sprickstängning. Flyaska visade ett imponerande förhållande mellan yttre sprickor med kalcitkristaller men hindrade samtidigt möjligen tillväxten av C-S-H inuti sprickan. Dessa resultat indikerade att tillsattematerial spelar en avgörande roll i den autogena självläkande processen.

En otillräcklig koncentration av kalcium- och silikajoner i sprickan styrs förmodligen av två huvudsakliga hinder:

- Hinder 1 - Den ogenomträngliga bindemedelsmatrisen med låg mängd sammankopplade porer relaterade till det låga förhållandet mellan vatten och bindemedel, höga mängder tillsattematerial typ silikastoft etc.;

- Hinder 2 - Det ogenomträngliga skalet av hydratiseringsprodukter som snabbt bildas på ytan av ny exponerad, ohydratiserad cement.



Figur 2. Det föreslagna schemat för självläkande mekanism (modifierat från Rajczakowska et al., 2019b).

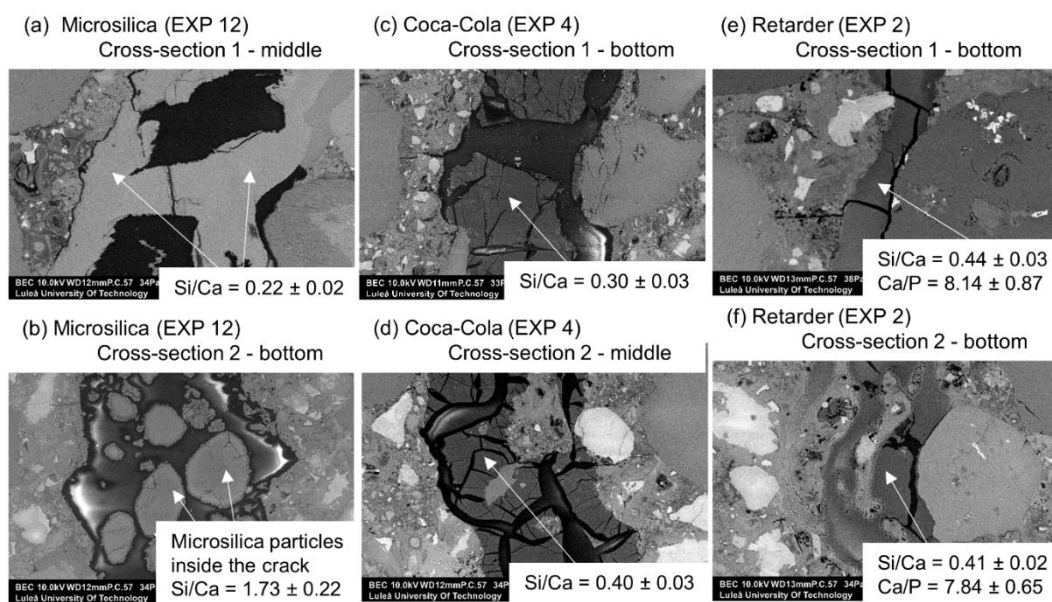
3.2. Exponeringsförhållanden

Hinder 2 åtgärdades genom att kontrollera hydratiseringshastigheten inuti sprickan genom att till den läkande vätskan tillsätta en fördröjningsblandning. Fyra provuppställningar med olika exponeringar testades:

- vattenbelastningar (4 exponeringar),
- effekterna av temperaturen (2 temperaturer),
- närvaron av hydratiseringshastighetsmodifierande blandningar (2 exponeringar),
- ytterligare joner / partiklar i självläkande lösning (4 exponeringar).

Sammanfattningen av de observerade effekterna av både intern och extern självläkning för varje applicerad exponering presenteras i Bilaga 1.

Exponeringsförhållanden modifierade genom användning av cyklisk vätning, vilket begränsade de använda vattenvolymer, resulterade inte i tillfredsställande självläkning (exponeringar 5 till 9). Lägre temperaturer i de applicerade temperaturcyklerna främjade bildandet av ettringit och resulterade i sprickstängning. Den ytterligare optimeringen av betongblandningen eller ökning av tiden för exponering för låga temperaturer kan förmodligen leda till en högre självläkande effektivitet. De bästa resultaten med avseende på extern och intern sprickstängning erhöles för mikrosilikablandning (Exponering 12, figur 3ab), Coca-Cola-exponering (exponering 4, figur 3cd) och den retarderande blandningen (exponering 2, figur 3ef).

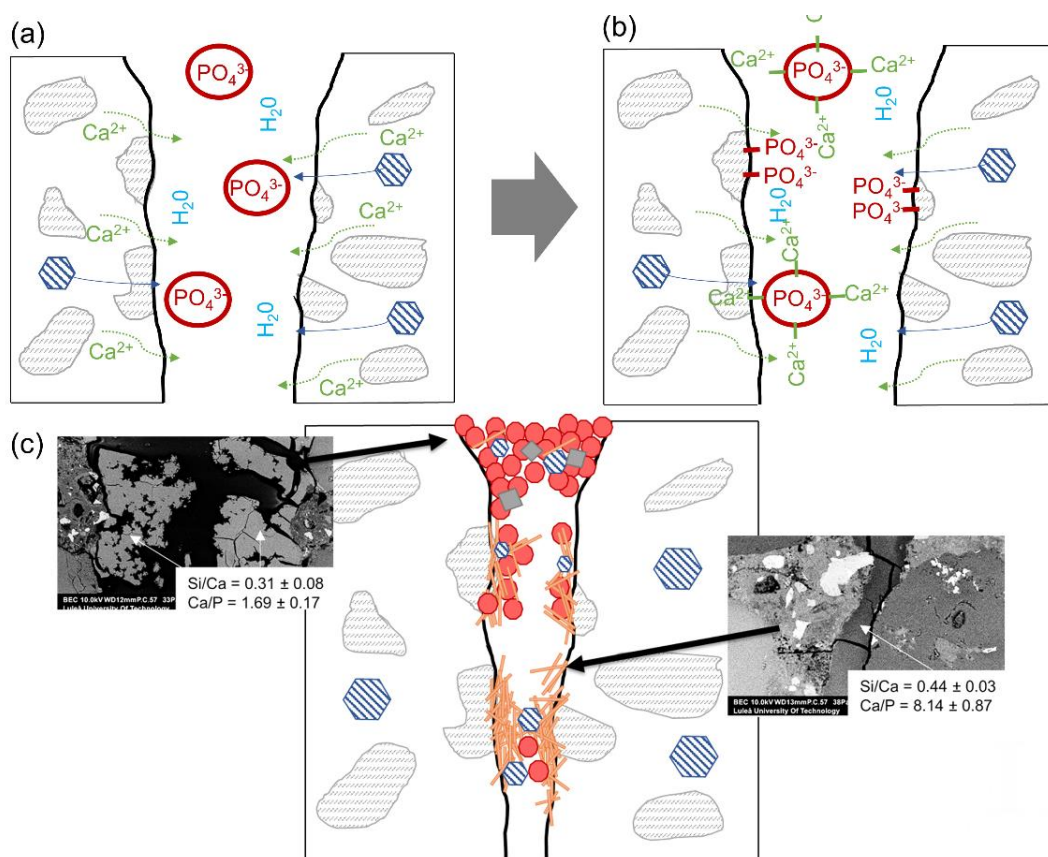


Figur 3. Svepelektronmikroskops bilder av sprickan med självläkande produkter i olika tvärsnitt för de mest effektiva självläkande exponeringarna: (a) (b) mikrosilikablandning, (c) (d) Coca-Cola, (e) (f) retarder-blandning (modifierad från Rajczakowska et al., 2019c).

Den mest effektiva externa och interna självläkningen observerades i fallet med exponeringen baserad på fosfathämmare (Exposition 2). Mekanismen inkluderar eventuellt två distinkta processer (figur 4). Den första processen är relaterad till den retardation av blandningen. I detta fall adsorberas fosfatjonerna på ytan av ohydratiserade cementkorn, vilket leder till en långsammare bildning av C-S-H, portlandit och ettringit. Detta hämmar bildningen av ett tätt ogenomträngligt skal (hinder 2). Mängden C-S-H bildad inuti sprickan ökade med avståndet från provets yta vilket indikerar en högre koncentration av kalcium och silikatjoner djupare inuti sprickan, vilket således stödjer den föreslagna mekanismen. Den andra processen är baserad på en direkt reaktion mellan fosfatjonerna från retardern och kalciumjonerna från de icke-hydratiserade cementkornen och från cementmatrisen. Detta leder till utfällning av kalciumfosfatföreningar inuti sprickan, vilket bidrar till det höga förslutningsförhållandet som observerats i exponering 2.

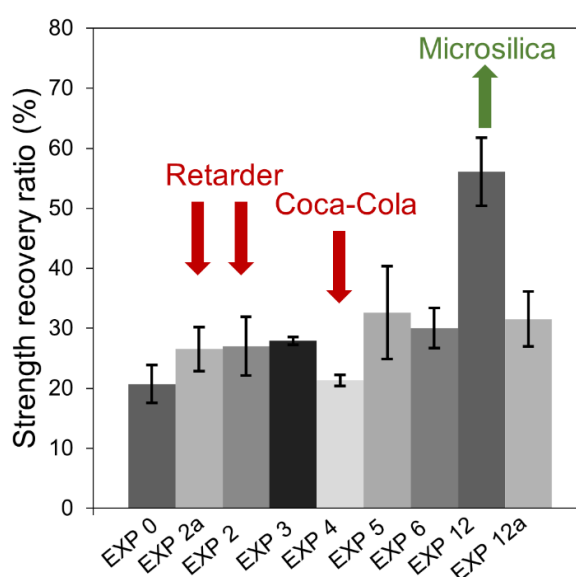
Coca-Cola-exponeringen, som potentiellt innehåller sackaros och betydande mängder fosfater, förväntas följa en liknande mekanism som det beskrivna fallet med användning av retarder.

Blandningen av vatten- och silikastoft (exponering 12) inducerade den högsta böjhållfastheten igen. Partiklarna fungerade antagligen som kärnbildningsställen för hydratiseringsprodukterna inuti sprickan. Mekanismen här verkar vara liknande som för PVA-fibrer.



Figur 4. Antagen självläkande mekanism för prover exponerade för fosfatbaserade retarderande tillsatsmedel (modifierad från Rajczakowska et al., 2019c).

Betydande återskapande av den mekaniska styrkan (figur 5) är möjlig och indikerades för exponeringsmiljö 12 (vatten med mikrosilica) uppnå cirka 60% av den ursprungliga böjdraghållfastheten. Resterande exponeringar uppvisade värden för återskapande av den mekaniska styrkan, som liknar provkroppar som endast härdats i luft. Dessvärre gav den imponerande interna självläkningen som observerades i Exponeringsmiljö 2 inte lika tillfredsställande utveckling av mekaniska styrka.



Figur 5. Styrke-återhämtningsgrad för utvalda exponeringar (modifierad från Rajczakowska et al., 2019c).

Valda exponeringar testades också på betongplattor. Retarderande tillsatsmedel gav tillfredsställande extern sprickförslutning (Figur 6).



Figur 6. Verifiering av den betongsammansättning med retarderande tillsatsmedel före och efter läkning av ett fragment av sprickan.

4. SLUTSATSER

Följande slutsatser kan dras från hittills utförda försök:

- En stor mängd cement i betongblandningen garanterar inte effektiv autogen självläkning av sprickor;
- En tät och ogenomtränglig porstruktur med t.ex. ett lågt förhållande mellan vatten och cement eller en hög mängd kiseldioxidrök begränsar transporten av kalcium- och silikonjoner till sprickan, vilket minskar utfällningen av läkande produkter;
- Flygaska stöder bildningen av ett tjockt lager kalcit över spricköppningen. Det stöder inte återhämtningen av böjdraghållfastheten på grund av bristen (eller begränsad) bildning av helande produkter inuti sprickan, särskilt den bärande fasen C-S-H;
- Kalciumkarbonat (kuboidkristaller) bildas nära provets yta, vid spricköppningen, medan C-S-H och ettringit (nålliknande produkter) utvecklas djupare inuti sprickan. Bildningen av C-S-H och ettringit är förmodligen ansluten till böjdraghållfastheten igen. Å andra sidan är kalcit, som inte stöder återhämtningen av de mekaniska egenskaperna, eventuellt ansvarig för kontrollen av förhållandena inuti sprickan, t.ex. hjälper till att få en högre kalcium- och silikajonkoncentration inuti sprickan;
- Enbart vatten är otillräckligt för att skapa och säkra en god självläkning;
- Ett fosfatbaserat retarderande tillsatsmedel främjar självläkande genom sprickförslutningen vid spricköppningen såväl som internt; den självläkande mekanismen är förmodligen baserad på två processer, d.v.s. hämmar bildandet av ett tätt hydratiseringsskal på ytan av ohydratiserade cementkorn och utfällning av kalciumfosfatföreningar inuti sprickan. Tyvärr ledde denna exponering inte till återhämtning av styrka igen, vilket tyder på att tillfredsställande intern sprickstängning inte nödvändigtvis bidrar till återhämtning i mekaniska parametrar;
- Vatten blandat med silikastoft stöder en extern sprickstängning och inducerar böjdraghållfasthet. Kiseldioxidpartiklarna fungerar som kärnbildningsställen för bildning av självläkande produkter.

Rekommendationer:

Blandningskomposition

- Tillsättning av PVA fibrer tenderar att stärka självläkande effekt,
- Tillsats av flygaska som uppfyller kraven för tillsatsmaterial i cement främjar i vissa fall extern sprickstängning vid exponering av vatten
- Hög mängd cement främjar i allmänhet självläkning, men vissa villkor relaterade till t.ex. vatten / cementförhållande eller härdningsvillkor måste vara uppfyllda

Exponeringsförhållanden

- Exponering för vatten garanterar inte en framgångsrik självläkningsprocess för merparten av undersökta betongsammansättningar.
- Tillsats av vissa kemiska tillsatsmedel och / eller mikropartiklar tillsatt i blandningsvattnet tenderar att ge förbättrade självläkande effekter.

Referenser

De Rooij, M., Van Tittelboom, K., De Belie, N., & Schlangen, E. (Eds.). (2013). Self-healing phenomena in cement-Based materials: state-of-the-art report of RILEM technical committee 221-SHC: self-Healing phenomena in cement-Based materials (Vol. 11). Springer Science & Business Media.

Gartner, E. (2004). Industrially interesting approaches to "low-CO₂" cements. *Cement and Concrete research*, 34(9), 1489-1498.

Jonkers, H. M. (2007). Self-healing concrete: a biological approach. In *Self-Healing Materials* (pp. 195-204). Springer Netherlands.

Rajczakowska, M., Habermehl-Cwirzen, K., Hedlund, H., & Cwirzen, A. (2019a). Autogenous Self-Healing: A Better Solution for Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(9), 03119001.

Rajczakowska, M., Habermehl-Cwirzen, K., Hedlund, H., & Cwirzen, A. (2019c). The Effect of Exposure on the Autogenous Self-Healing of Ordinary Portland Cement Mortars. Submitted.

Rajczakowska, M., Nilsson, L., Habermehl-Cwirzen, K., Hedlund, H., & Cwirzen, A. (2019b). Does a High Amount of Unhydrated Portland Cement Ensure an Effective Autogenous Self-Healing of Mortar?. *Materials*, 12(20), 3298.

Rajczakowska, Magdalena. (2019d). Self-Healing Concrete. Licentiate Dissertation. Luleå tekniska universitet.

Yang, K. H., Jung, Y. B., Cho, M. S., & Tae, S. H. (2015). Effect of supplementary cementitious materials on reduction of CO₂ emissions from concrete. *Journal of Cleaner Production*, 103, 774-783

BILAGA 1

Sammanfattning av resultaten från experiment 2 - effekt av exponeringsförhållanden (modifierad från Rajczakowska et al., 2019c).

Exponering	Förkortning	Extern självläkande	Intern självläkande
Avjoniserat vatten blandat med Accelerator i proportioner 3: 1 (nedsänkning)	EXP 1	Mycket begränsad sprickstängning; Flera kalcitkristaller av olika former	Nästan ingen läkning; Flera mikrons tjocka kalcitlager under ytan, inuti - få tjockare kalcitavlagringar blandade med CSH (Si / Ca = 0,19)
Avjoniserat vatten blandat med Retarder i proportioner 3: 1 (nedsänkning)	EXP 2	Sprickan nästan helt läkt; kalciumfosfatföreningar på ytan med en viss mängd natrium härrörande från den självläkande blandningen	Mycket hög invändig spricka; Kalciumfosfatföreningar liksom CSH; Si / Ca och Ca / P ökar med sprickdjup
Mättad nedsänkning av kalkvatten	EXP 3	Mycket bra extern självläkande; tätt skikt av kalcitkristaller närvarande vid ytan	Nästan ingen intern självläkande; några självläkande produkter med en genomsnittlig Si / Ca på 0,3
Coca-Cola nedsänkning	EXP 4	Effektiv extern sprickstängning; kalciumfosfatföreningar med Ca / P i intervallet 1,5 till 2,5	Självläkande produkter synliga inne med CSH liknande fällningar med Si / Ca på cirka 0,3-0,4; vissa kalciumfosfatprodukter presentera
Avjoniserat vatten nedsänkning	EXP 5	Mycket begränsad extern läkning, ettringit och kalcitkristaller som fyller sprickan	Ettringit synligt nära ytan; ingen intern självläkande
Avjoniserat vattenfördjupning med cyklisk indunstning (72 timmars cykel)	EXP 6	Vissa sprickstängningar; större kalcitkristaller som täcker sprickan	Skikt av kalcit inuti provets stängning till ytan, få självläkande produkter i djupare delar av sprickan
Torra / våta (avjoniserat vatten) cykler 24 timmar / 24 timmar	EXP 7	Nästan ingen extern självläkande med ett litet kalcitkristallskikt vid ytan	Ingen intern självläkande utom för få läkemedelsprodukter avsatta på PVA-fibersytan
Avjoniserat vattenfördjupning av provet upp till 1 mm	EXP 8	Minimal extern läkning, ettringit närvarande; inga märkbara skillnader mellan exponering 8 och 9	Ettringit synligt nära ytan; ingen intern självläkande
Avjoniserat vatten nedsänker upp till 5 mm höjd av provet	EXP 9		
Vattenfördjupningstemperaturcykel 24 h/ 20°C och 24 h/ 40°C	EXP 10	Mycket begränsad extern läkning, kalcitkristaller som fyller sprickan	Knappast någon intern läkning med endast enstaka kalcitkristaller
Vattenfördjupningstemperaturcykel 24 h/ 20°C och 24 h/ 5°C	EXP 11	Effektiv stängning av extern spricka; kalcitkristaller inuti sprickan såväl som ett tjockt ettringitlager	
Avjoniserad nedsänkning med silikastoft 1,25% vikt	EXP 12	Mycket hög extern självläkande med förtätad kalcitstruktur som fyller sprickan	Agglomerat av silikastoft inuti sprickan utan självläkande produkter.