

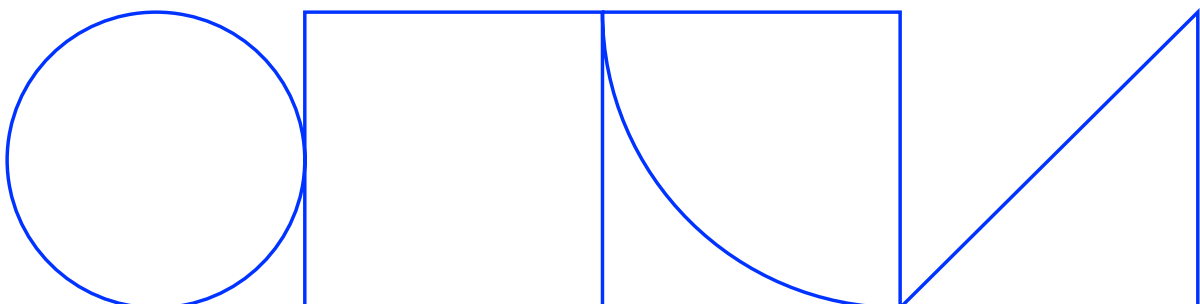
PROJEKTNR. 13845

Självläkande betong med miljövänliga bindemedel - 2

Sammanfattning

Magdalena Rajczakowska, Andrzej Cwirzen, Hans Hedlund, Karin Habermehl-Cwirzen

2023-04-14

**SKANSKA**

Betong är ett byggnadsmaterial som används i stor utsträckning i bygg- och anläggningskonstruktioner, främst på grund av lågt pris, tillgänglighet och multifunktionalitet, vilket gör att det kan användas i de flesta byggda miljöer. Med tanke på dess mångsidighet och utbredda användning är det viktigt att minska dess koldioxidavtryck. Det kan uppnås genom olika metoder, såsom partiell ersättning av *Ordinary Portland Cement* (OPC) med industriella biprodukter eller aktiverande avfallsmaterial, användning av cement med låg kolhalt eller återanvändning och återvinning. Ett annat intresseområde för att uppnå ökad livslängd för betong är att utveckla och utnyttja cementbaserade material med självläkande egenskaper.

Betong har använts i århundranden och användningen har succesivt utvecklats från enkla kraftiga konstruktioner, som använt sig av betongens goda egenskaper att bära trycklast, till mer optimerade slanka betongkonstruktioner där armering och betong kan komplettera varandras egenskaper. Betong är ett sprött material som har en benägenhet att spricka, varvid en konstruktions mekaniska prestanda, funktion och beständighet kan försämrats. Armerade betongkonstruktioner är designade för att spricka.

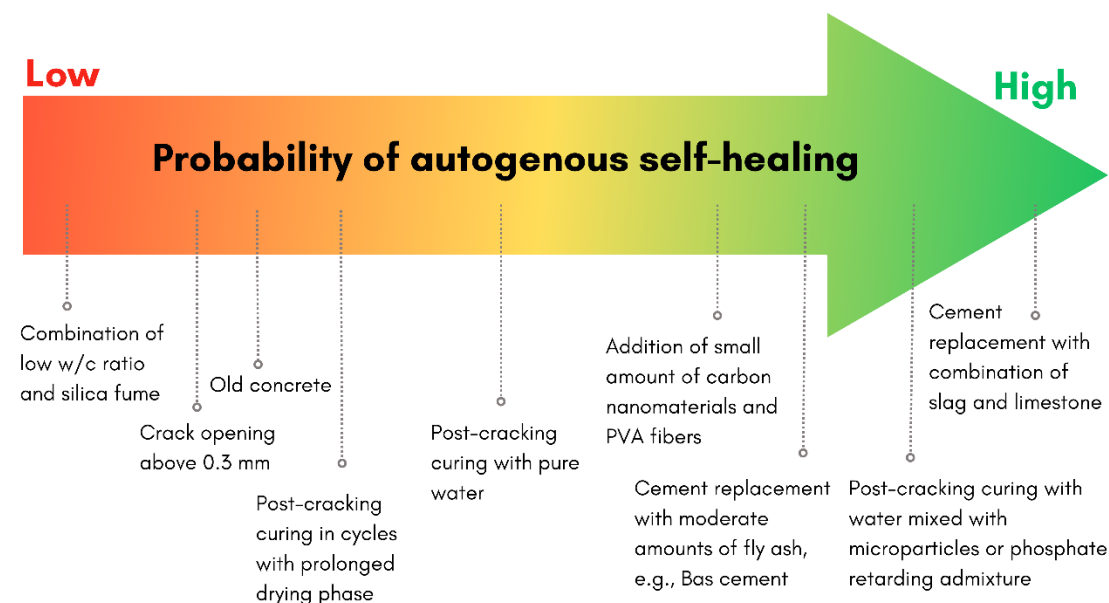
I detta projekt har omfattande studier och experimentella försök genomförts. Projektets resultat kan sammanfattas i ett antal råd och rekommendationer vid användning av miljövänligt bindemedel i betong.

Slutsatser

I undersökningen har det visat sig att en hög cementhalt i betongblandningen inte garanterar en effektiv autogen självläkning av sprickor.

Cementbaserade material har en inneboende förmåga att själv reparera sprickor upp till bredder på 150 µm. Men även bredare sprickor kan läkas genom att använda olika "stimulatorer" för att öka självläkningsprocessen, såsom att lägga till specifika typer av fibrer, kristallina tillsatser eller särskilda exponeringsförhållanden.

I undersökningen har ett antal faktorer identifierats relaterade till blandningens sammansättning och dess effekt på sannolikheten för självläkning, vilket illustreras i figuren nedan.



Undersökta parametrar och deras effekt på sannolikheten för god självläkningsförmåga.

- Självläkning av termiskt skadad (brandskadad) cementpasta innebär tätning av sprickor och kemisk-fysikaliska förändringar av det hydratiserade bindemedlet, vilket underlättar återhämtningen av mekanisk prestanda. Däremot, vid mekanisk skada, sker självläkning i sprickorna, vilket leder till hållbarhetsförbättring och återhämtning av styrkan.
- För mekaniskt och termiskt skadade cementbaserade material är mekanismen för självläkning av sprickor förmodligen baserad på processerna diffusion-upplösning-fällning.
- Sammankopplat por-/mikrospricksystem i betongen kommer sannolikt att vara en viktig egenskap som reglerar överföringen av joner till sprickor, vilket gör att självläkningsprocessen kan utvecklas för mekaniskt och termiskt spruckna cementmaterial. Därför tenderar cementbaserade material med tät bindemedelsmatris och låg permeabilitet att ha en lägre självläkande effektivitet.
- För mekaniskt sprucket material spelar blandningssammansättningsparametrar och miljöexponering en betydande roll för självläkning. Ändå garanterar inte en stor mängd ohydratiserade cementpartiklar framgångsrik självläkning. Å andra sidan identifieras den maximala belastningstemperaturen, typ av miljöexponering (återhärdning) och mängder av fina och grova ballaster som avgörande för återvinningen av tryckhållfasthet av termiskt skadade cementmaterial. För OPC-baserade material (utan *Secondary Cementitious Materials*, SCM, dvs *alternativa bindemedel*) är förhållandet som exempelvis mängd cement och vatten-cementtalet, förmodligen mindre kritiska.
- Vatten är nödvändigt för självläkningsprocessen, både när det gäller mekaniskt och termiskt spruckna cementmaterial. Vattenexponeringen visade dock begränsad effektivitet för de mekaniskt inducerade sprickorna. Därför kan extern applicering av vissa miljöstimulatorer, d.v.s. vatten blandat med olika joner/partiklar, leda till en ökad och därigenom en förbättrad självläkningsförmåga.

Sammanfattning

Betong är ett mycket populärt byggmaterial, främst på grund av dess låga pris, tillgänglighet och multifunktionalitet, vilket gör att det kan användas i de flesta byggmiljöer. Med tanke på dess mångsidighet och utbredda användning är det viktigt att minska dess koldioxidavtryck. Det kan uppnås genom olika metoder, som att delvis ersätta OPC med industriella biprodukter eller aktivera avfallsmaterial, använda lågkolhaltig cement eller återanvända och återvinna. Ett annat intresseområde för att uppnå ökad livslängd för betong är att utveckla och utnyttja cementbaserade material med självläkande egenskaper.

Cementbaserade material har en inneboende förmåga att självreparera sprickor upp till bredder på 150 µm. Men bredare sprickor kan läkas genom att använda olika "stimulatorer" för att öka självläkningsprocessen, såsom att lägga till specifika typer av fibrer, kristallina tillsatser eller särskilda exponeringsförhållanden. Partiell läkning kan också uppnås under extrema förhållanden. Till exempel kan strukturer som fått skador vid höga temperaturer delvis läkas genom att utföra härdning efter brand. Återhämtningsmekanismen involverar rehydrering och självläkning av högttemperatursprickor. Flera variabler definierar processeffektiviteten, såsom härdningsförhållanden, bindemedelstyp, laddningstemperatur och kylning efter brand. Målet med denna Ph.D. forskningsprojektet var att undersöka de fysikalisk-kemiska processerna och mekanismerna bakom den autogena självläkningen av cementbaserade material. Två typer av skador utvärderades: mekaniska skador och högttemperaturskador. Dessutom var ett av projektets mål att identifiera potentiellt nya stimulatorer för förbättrade självläkande egenskaper. Användningen av cementbaserade material med låg kolhalt var av primärt intresse.

Det observerades att hög cementhalt i betongblandningen inte garanterar en effektiv autogen självläkning av sprickor. En tät, ogenomtränglig bindemedelmikrostruktur begränsade transporten av kisel- och kalciumjoner till sprickan och minskade utfällningen av läkningsprodukterna. Med tillsats av flygaska ökade sprickförslutningsförhållandet nära sprickmynningen, men återhämtningen av böjghållfastheten stöddes inte, förmodligen på grund av det lilla antalet bärande faser inuti sprickan. Alla cementbaserade SCM-kalkstensmaterial har visat överlägsen självläkande effektivitet jämfört med rena OPC eller OPC/kalkstensbindemedel, förmodligen beroende på en synergistisk effekt mellan kalkstenen och mineraltillsatserna. Bindemedelskompositionen påverkade den självläkande mekanismen, vilket ledde till varierande nivåer av prestandaåtervinning.

Läkning baserad på exponering för rent vatten hade begränsad effektivitet trots olika vattenvolymer och temperaturcykler. Den högsta sprickförslutningen observerades med tillsats av en retarderande blandning i härdningsvattnet. Blandningen antas ha blockerat bildandet av ett tätt hydratiseringsskal på ytan av de ohydratiserade cementkornen. Fosfor och kalcium upptäcktes i de självläkande faserna i sprickan. Återvinning av böjdraghållfasthet genom att bilda C-S-H i sprickan registrerades vid användning av vatten blandat med mikrokiseldioxidpartiklar.

Användning av kalkvatten med en liten dos av kolnanomaterial visade förbättrad sprickförslutning vid hög temperatur och mekanisk prestanda jämfört med vanlig cementpasta och kranvattenhärdning. Två distinkta processer identifierades för återvinningsprocessen av ett termiskt sprucket cementartat material, dvs. rehydrering och självläkning av sprickorna. Fasmontering och cementpastans porositet utsattes för förändringar med ökande belastningstemperatur. Dessa förändringar reverserades förmodligen delvis vid applicering av en vattenåterhärdningsprocess efter kylning, d.v.s. de ohydratiserade cementkornen hydratiseras ytterligare, bildar nya hydrater, porerna fylls med nya hydratiseringsprodukter och befintliga faser reagerar för att bilda nya, t.ex. CaO reagerade med vatten för att bilda Ca(OH)₂. Den utvecklade tolkningen av maskininlärningsmodellen indikerade att hållfasthetsåtervinningen beror på temperaturområdet som orsakade skadan, återhärdningsförhållanden och mängden fint och grovt ballast

INNEHÅLL

Slutsatser	1
Sammanfattning	3
Bakgrund	4
Forskningsprogram	5
Resultat	7
MEKANISKT ÖPPNADE SPRICKOR.....	7
SPRICKOR TILL FÖLJD AV HÖG TEMPERATUR (BRAND)	11

Bakgrund

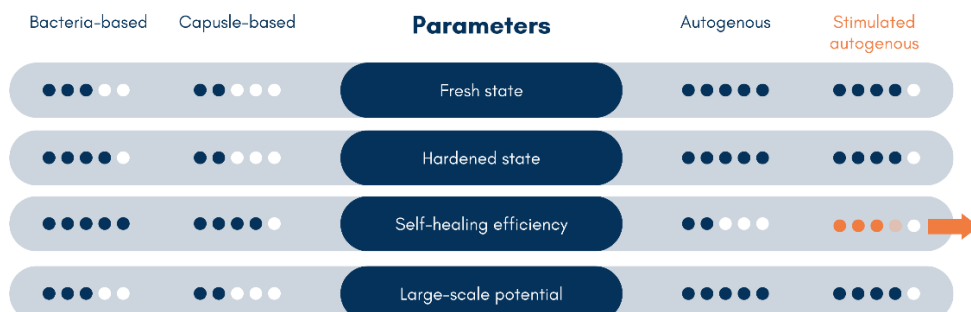
Cementbaserade material är benägna att spricka på grund av sin spröda natur. Sammankopplade sprickor bildar diskontinuiteter i den hydratiserade bindemedelsmatrisen, vilket underlättar aggressiva ämnens transportväg in i materialet (Borg et al. 2018). Detta påverkar betongens hållbarhet, orsakar korrosion av stålarmering och minskar livslängden på betongkonstruktioner. Beräknade globala korrosionskostnader nådde 2,5 miljarder USD 2016, vilket motsvarar 3,4 % av den globala BNP (bruttonationalprodukten). Cirka 10 % av denna kostnad är kopplad till byggbranschen. Dessutom är reparation och underhåll av betongkonstruktioner en återkommande nödvändighet eftersom minst hälften av de reparerade konstruktionerna går sönder igen, 75 % av dem under de första 10 åren av tjänst (Borg et al. 2018). Denna situation är obekvämt inte bara ur ekonomisk synvinkel utan medför också samhälls- och miljöfrågor kräver att samhället går över till hållbara, hållbara byggmaterial, som inte kräver omfattande reparationer eller materialkostsamma byten. Vad kan göras för att öka hållbarheten hos cementbaserade material? Detta projekt har undersökt självläkande cementbaserade kompositmaterial som en lösning på konkreta sprickfrågor.

Cementbaserade material uppvisar unika likheter med biologiska organismer, d.v.s. de kan självreparera. Självläkande material är "material som har en negativ hastighet av skadebildning i ett eller flera skeden av sin livstid" (De Rooij et al., 2013). Det finns två huvudsakliga självläkande tillvägagångssätt för den självläkande konkréten: autonom och autogen självläkning. I den autonoma autoreparationen är de självläkande komponenterna specialdesignade externa ämnen som målmedvetet är inbäddade i betongblandningen under gjutningen, t.ex. mikrokapslar eller bakterier. Å andra sidan förutsätter den autogena metoden att den självläkande egenskapen härrör direkt från standardbetongingredienserna, d.v.s. hydratiserat cementbindemedel.

Under det senaste decenniet har många studier om autonom självläkning publicerats med fokus på imponerande självläkningseffektivitet som erhållits, främst i laboratorieskala. Ändå, eftersom betong är ett råmaterial med en hård inre miljö och högt pH, visade självläkande metoder som initialt utformats för andra typer av material, t.ex. mikrokapslar, avsevärda svårigheter vad gäller betongens egenskaper i färskt och härdat tillstånd.

Den autogena självläkningsprocessen kan förbättras genom att applicera specifika stimulatorer, d.v.s. substanser som förbättrar återhämtningen av hållbarhet och mekaniska egenskaper. Självläkning av cementbaserade material har varit av intresse för vetenskapssamfundet, byggföretag och ingenjörer i decennier. Potentialen som ligger i denna lösning är enorm. Det kan bli en "snabb lösning" på hållbarhetsproblemen, vilket resulterar i minskade kostnader för reparationer och underhåll av strukturer. Följaktligen skulle koldioxidutsläppen i samband med renovering av byggnader minska drastiskt. Nyligen

utförd Life Cycle Assessment (LCA)-analys visar att betongens miljöpåverkan kan minskas med 56 %–75 % tack vare självläkande egenskaper (Van Belleghem, 2016).



Figur 1. Jämförelse av de självläkande konkreta tillvägagångssätten (baserat på Rajczakowska et al. 2019a)

En omfattande litteraturgenomgång utförd i början av detta projekt avslöjade en relativt hög effektivitet hos de autonoma självläkande metoderna, d.v.s. kapsel- och bakteriebaserade (Rajczakowska et al. 2019, figur 1), i jämförelse med autogen självläkning; Deras komplexitet, höga pris och negativa effekt på initiala betongegenskaper visades dock också. Å andra sidan visade sig den "stimulerade" autogena självläkningen vara det mest lovande tillvägagångssättet när det gäller den storskaliga potentialen hos autoreparationstekniken (Figur 1). Därför undersöktes detta tillvägagångssätt ytterligare i denna studie.

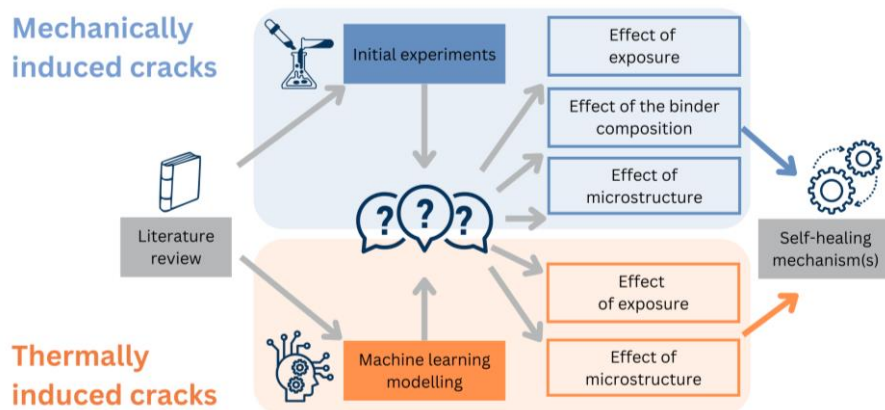
Syfte med projektet: att undersöka de styrande faktorerna för den autogena självläkande mekanismen för de mekaniskt och termiskt inducerade sprickorna i cementbaserade material.

Projektmål:

1. Jämför olika självläkande metoder avseende betongens färska och härdade egenskaper, deras kostnad, säkerhet och fullskaliga tillämpningar.
2. Anpassa och/eller modifiera en testmetod för experimentell utvärdering av autogen självläkning.
3. Tillämpa tolkbar artificiell intelligensmodellering för en datadriven analys av självläkningsprocessen.
4. Undersöka/utveckla nya stimulatorer av den autogena självläkningsprocessen, med fokus på miljövänliga bindemedel.
5. Studera effekter av olika variabler på den självläkande mekanismen hos mekaniskt och termiskt spruckna cementbaserade material.
6. Föreslå en självläkande modell(er) baserade på fysikalisk-kemiska processer för mekaniskt och termiskt knäckta cementmaterial.

Forskningsprogram

Forskningen inleddes med litteraturoversikten om självläkning av cementartade material. Först jämfördes de autogena och autonoma tillvägagångssätten med avseende på deras effekt på de initiala betongegenskaperna i färskt och härdat tillstånd samt funktionalitet. Baserat på analysen valdes autogen självläkning ut som mer praktisk och kompatibel med betongegenskaper på nuvarande teknisk nivå. Ytterligare litteraturstudier inkluderade att undersöka de fysikalisk-kemiska principerna för självläkning och kritiska faktorer som påverkar dess effektivitet. Dessutom inkluderades olika typer av autoreparerade skador i analysen, det vill säga relaterade till mekanisk belastning och försämringsprocesser. Identifierade kunskapsluckor indikerade två forskningsvägar: självläkning av mekaniskt och termiskt inducerade sprickor.

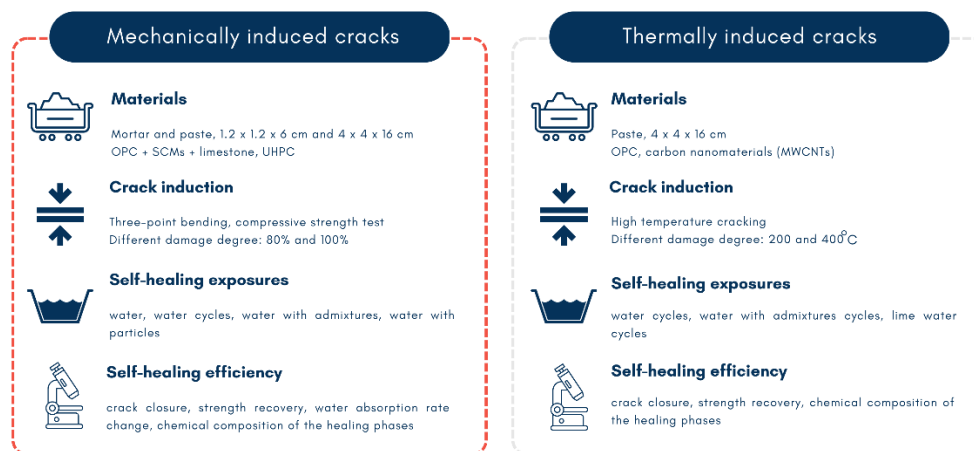


Figur 2. Forskningsprogram (Rajczakowska, 2023).

Två metoder valdes ut för att få en första förståelse av den självläkande mekanismen (Figur 2). För mekaniskt inducerade sprickor utfördes initiala experiment för att skanna efter signifikanta faktorer som potentiellt påverkar den självläkande effektiviteten, dvs hög cementmängd, ålder, läkningstid och förekomst av flygaska. Analysen visade att en tät mikrostruktur potentiellt förhindrar effektiv läkning, medan flygaska underlättade kalcitutfällning på ytan. Därför föreslogs en förenklad läkningsmekanism, och flera forskningsfrågor formulerades. Den ytterligare experimentella analysen bestod av effekten av exponeringsförhållanden, bindemedelssammansättning och mikrostruktur.

En omfattande databas skapades baserat på litteraturoversikten för termiskt inducerade sprickor. Data analyserades med hjälp av maskininlärningsmodellering. Den utförda analysen av funktionsviktighet avslöjade ett starkt beroende mellan återhämtningen av tryckstyrkan och läkningsexponeringsförhållandena, d.v.s. återhärdningsförmågan.

De erhållna resultaten möjliggör formulering av forskningsfrågor och planering av ytterligare experiment. Vidare inkluderades effekten av exponering på läkning av sprickor vid hög temperatur. Slutligen analyserades och diskuterades resultaten. De huvudsakliga fysikalisk-kemiska processerna som kontrollerar självläkningen av de mekaniskt och termiskt inducerade sprickorna identifierades. Översikten över de material och metoder som använts i projektet presenteras i figur 3.

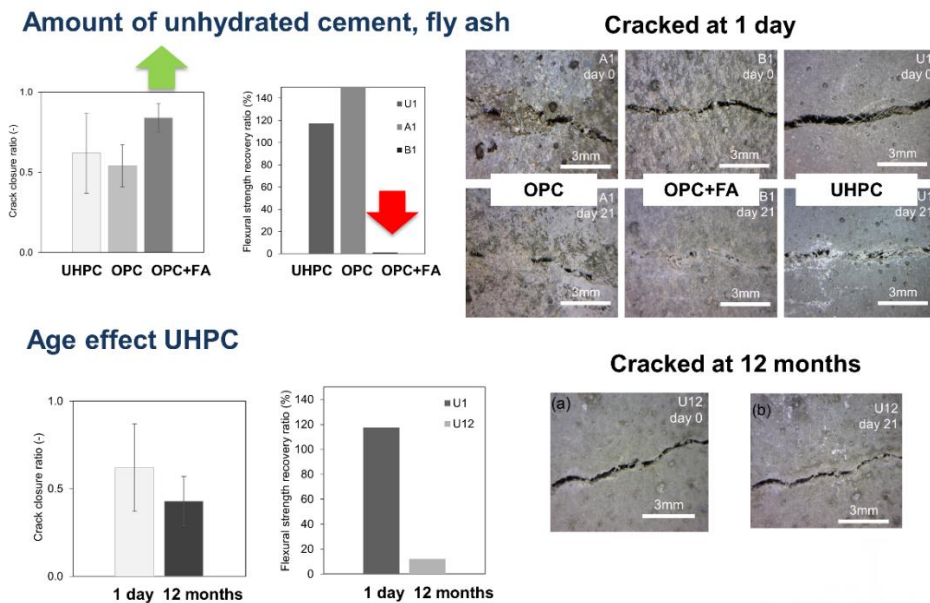


Figur 3. Översikt över material och metoder.

Resultat

Mekaniskt öppnade sprickor

Inledande experiment visade att en stor mängd cement, såsom i fallet med *Ultra-High-Performance Concrete* (UHPC), inte säkerställer en effektiv autogen självläkning av sprickor trots en potentiellt stor mängd ohydratiserade cementpartiklar tillgängliga (blandning U1). Betydligt högre sprickförslutningar observerades för OPC-bruk (A1) och murbruk innehållande flygaska (B1) (Figur 4).

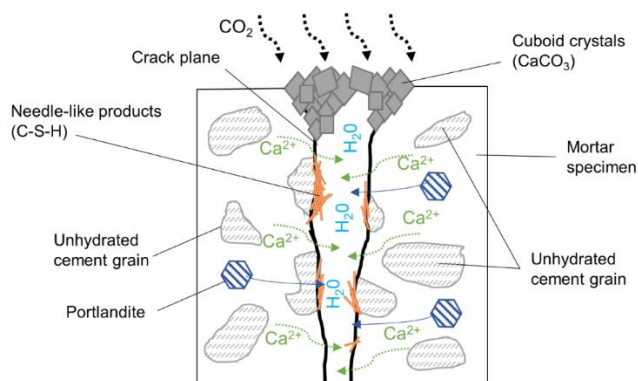


Figur 4. Blanda sammansättning och ålderseffekt (modifierad från Rajczakowska et al, 2019b.).

Huvudfasen som bildades i sprickan i prov B1 var kalciumkarbonat. Ingen hållfasthetsåtervinning observerades dock, vilket indikerade att trots ett enastående sprickförslutningsförhållande fälldes endast en minimal mängd av C-S-H in i sprickan. Det noterades att PVA-fibrerna stödde bildandet av läkningsfaser genom att skapa kärnbildningsställen på grund av deras hydrofila natur.

Sprickförslutningen var signifikant mindre för det åldrade UHPC-provet (U12) än för det 1 dag gamla provet (U1), som innehöll fler sammankopplade porer. Detta indikerar att porositeten hos bindemedelsmatrisen, särskilt mängden sammankopplade porer, är kritisk i självläkningsprocessen. Dessutom beror tillväxthastigheten för hydratiseringsprodukterna inuti den läkta sprickan främst på koncentrationen av kalcium- och kiseljoner. Därför påverkar bindemedelsmatrisens permeabilitet transporten av dessa joner in i sprickan effektivt. Därför kommer en tät, mindre porös cementmatris, till exempel i fallet med den åldrade UHPC, att hindra självläkningsprocessen.

Den utförda preliminära studien avslöjade flera grundläggande olösta problem relaterade till mekanismen för autogen självläkning (Figur 5). Den låga självläkande effektiviteten hos UHPC antydde att tillgängligheten av ohydratiserad cement inuti sprickan spelar en sekundär roll i den självläkande mekanismen och garanterar inte en tillfredsställande sprickförslutning. Flygaska visade ett bra externt sprickförslutningsförhållande med kalcitkristaller men hindrade samtidigt eventuellt tillväxten av C-S-H inuti sprickan. Dessa resultat indikerade att sekundära cementmaterial (SCM) är en styrande faktor för självläkningsprocessen.



Figur 5. Det föreslagna schemat för självhelande mekanism (Rajczakowska et al., 2019b).

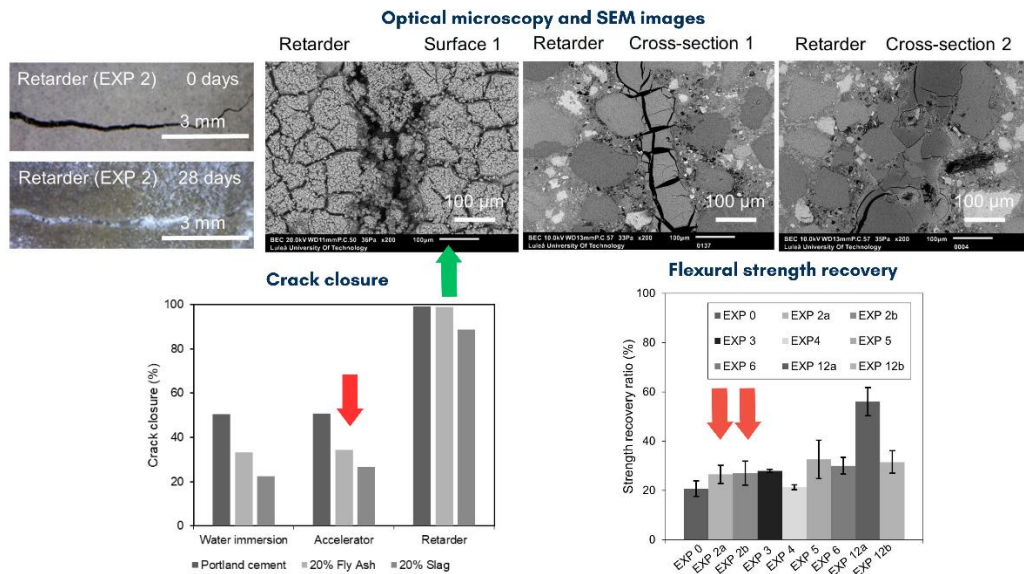
Följande hypoteser formulerades baserat på de första resultaten:

- **Hypotes 1:** Det ogenomträngliga hydreringsproduktskalet, snabbt bildat på ytan av nyexponerad ohydratiserad cement, förhindrar den pågående hydreringsprocessen inuti sprickan.
- **Hypotes 2:** Den täta bindemedelsmatrisen med låg sammankopplad porositet relaterad till t.ex. det låga förhållandet vatten till bindemedel leder till otillräcklig kalcium- och silikonjonkoncentration inuti sprickan.
- **Hypotes 3:** De kompletterande cementbaserade materialen, t.ex. flygaska, stödjer spricktätningen på grund av kalcitutfällning.

För att hantera hypotes 1 föreslogs olika härdningsregimer efter sprickbildning för att kontrollera hydratiseringshastigheten inuti den färsk sprickan. Fyra grupper av exponeringar testades: olika vattendopningsregimer (4 exponeringar), effekterna av temperaturen (2 exponeringar), närvaron av de hydratiseringshastighetsmodifierande tillsatserna (2 exponeringar) och ytterligare joner/partiklar i självläkningen lösning (4 exponeringar).

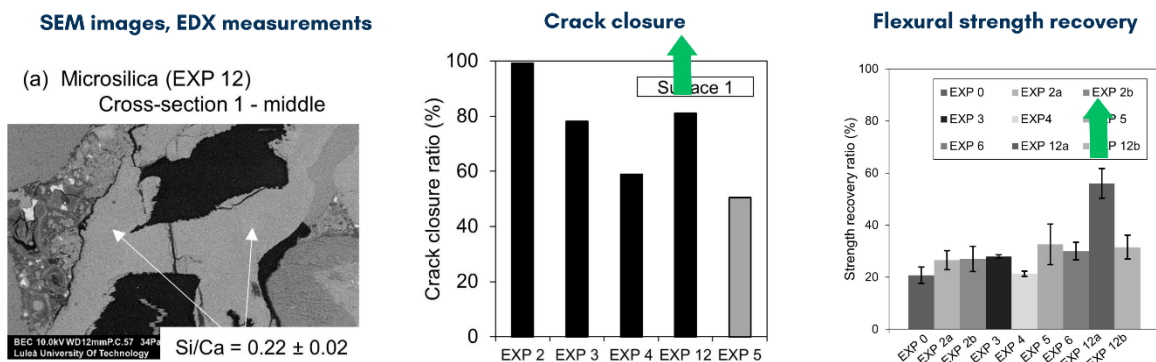
Exponeringsförhållanden modifierade genom att applicera cyklisk vätning och begränsning av använda vattenvolymer, resulterade inte i god självläkning. Lägre temperaturer i de applicerade temperaturcyklerna främjade ettringitbildning och resulterade i sprickförslutning. Den ytterligare optimeringen av betongblandningen eller förlängningen av exponeringstiden för låga temperaturer skulle förmodligen kunna leda till högre självläkande effektivitet.

Den mest effektiva externa och inre självläkningen observerades vid exponering baserad på fosfatretarder (Exponering 2, Figur 6). Mekanismen innefattar möjligen två distinkta processer. Den första processen är relaterad till blandningens bromsverkan. 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 bildandet av ett tätt ogenomträngligt skal. Mängden C-S-H som bildas inuti sprickan ökade med avståndet från provets yta, vilket indikerar en högre koncentration av kalcium- och silikatjoner djupare inuti sprickan, vilket stöder den föreslagna mekanismen. Den andra processen är baserad på en direkt reaktion mellan fosfatjonerna från retardern och kalciumjonerna från de ohydratiserade cementkornen och cementmatrisen. Detta leder till utfällning av kalciumfosfatföreningar inuti sprickan, vilket bidrar till det höga förslutningsförhållandet.



Figur 6. Effekt av stelmodifierande tillsatser i härdningslösningen efter krackning (modifierat från Rajczakowska et al., 2019c).

Applicering av en blandning av vatten och mikrokiseldioxidpartiklar (exponering 12, figur 7) inducerade den högsta böjhållfasthetsåtervinningen. Partiklarna tjänade förmodligen som kärnbildningsställen för hydratiseringsprodukterna inuti sprickan. Mekanismen här verkar likna fallet med PVA-fibrer. Signifikant återhämtning av böjhållfastheten (Figur 7), som nådde omkring 60 %, observerades. De återstående exponeringarna visade hållfasthetsåtervinningsvärden liknande prover härdade i luft. Tyvärr gav den imponerande interna självläkningen som observerades i Exponering 2 inte tillräckliga resultat för återhämtning av styrka (Figur 6).

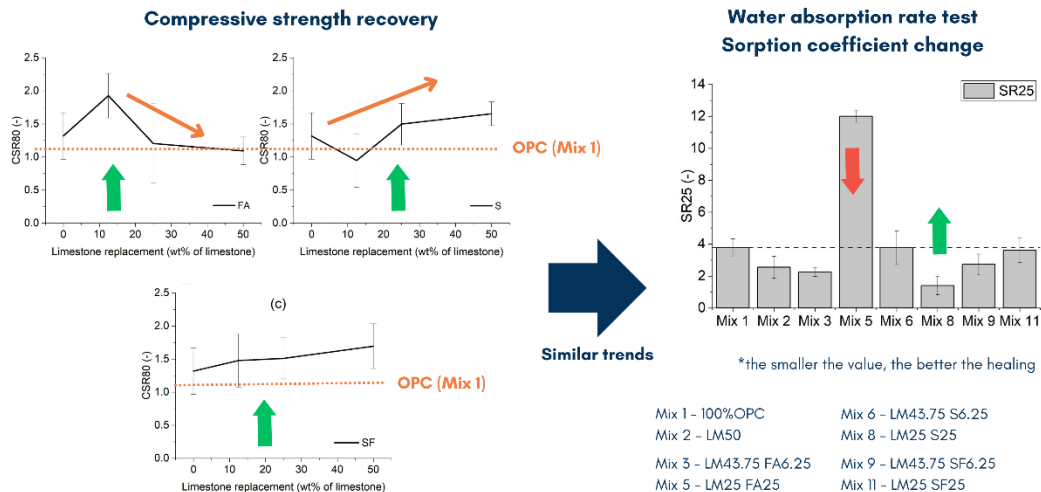


Figur 7. Effekt av mikrokiseldioxidpartiklar i härdningslösningen efter krackning (modifierat från Rajczakowska et al., 2019c).

För att ta itu med hypoteserna 2 och 3 studerades mikrostrukturen hos olika bruksblandningars effekt på självläkande effektivitet. Murbruk med 50 % cementersättning med kalksten i samband med SCM (analyserades eftersom ett av projektets mål var att fokusera på miljövänliga material).

De flesta SCMs-kalkstenscementmaterial har visat bättre självläkande effektivitet än rena OPC eller OPC/kalkstensbindemedel. Bindemedelssammansättningen påverkade den självläkande mekanismen vilket ledde till olika nivåer av prestationsåtervinning (Figur 8). En låg mängd flygaska ledde till den mest distinkta hållfasthetsåtervinningen; högre mängder var dock mindre effektiva (Figur 8). Å andra sidan var förhållandet omvänt för slagg, d.v.s. ökad slagghalt resulterade i bättre hållfasthetsåtervinning, vilket främst är synligt för

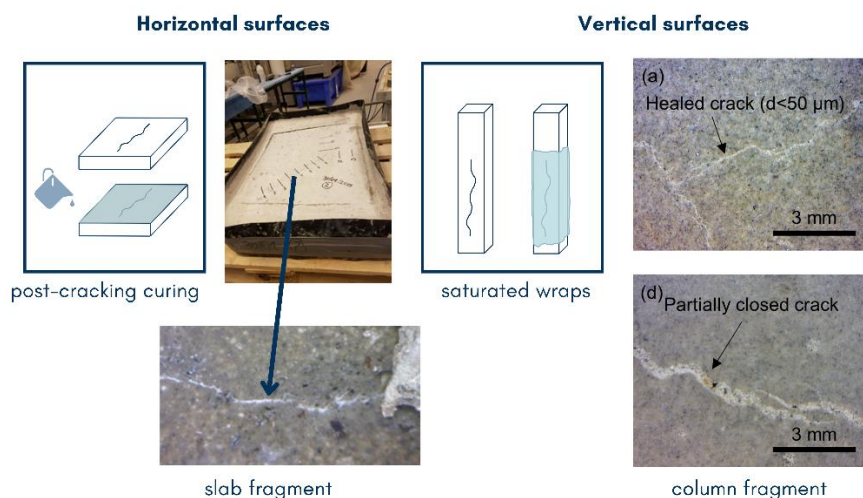
lägre skadeomfattning. Slutligen erhöles inga märkbara skillnader i CSR för att variera kiseldioxidhalten; den totala effekten av kiseldioxidtillsats var dock gynnsam jämfört med OPC-blandningen (Mix 1). Liknande mönster observerades i fallet med vattenabsorptionshastighetstestet (Figur 8).



Figur 8. Resultat av tryckhållfasthetsåtervinning och vattenabsorptionshastighetstest för blandade bruk (modifierad från Rajczakowska et al. 2023a).

Studiens resultat visade signifikanta skillnader i självläkande beteende mellan analyserade blandningar. Den kombinerade appliceringen av kalksten och SCM tvingar fram betydande förändringar i fassammansättningen och mikrostrukturen hos det hydratiserade bindemedlet, vilket kan ha positiva och negativa konsekvenser för läkningsprocessen. Till exempel underlättar mer Portlandit i tidig ålder puzzolanreaktionen på grund av hydreringsacceleration. Däremot kan en resulterande konsumtion av Portlandite orsaka en minskad koncentration av joner inuti sprickan, till exempel i fallet med lågreaktiv flygaska. Dessutom producerar den ökade puzzolanreaktionen en tät bindemedelsmatris, vilket hindrar överföringen av joner in i sprickan.

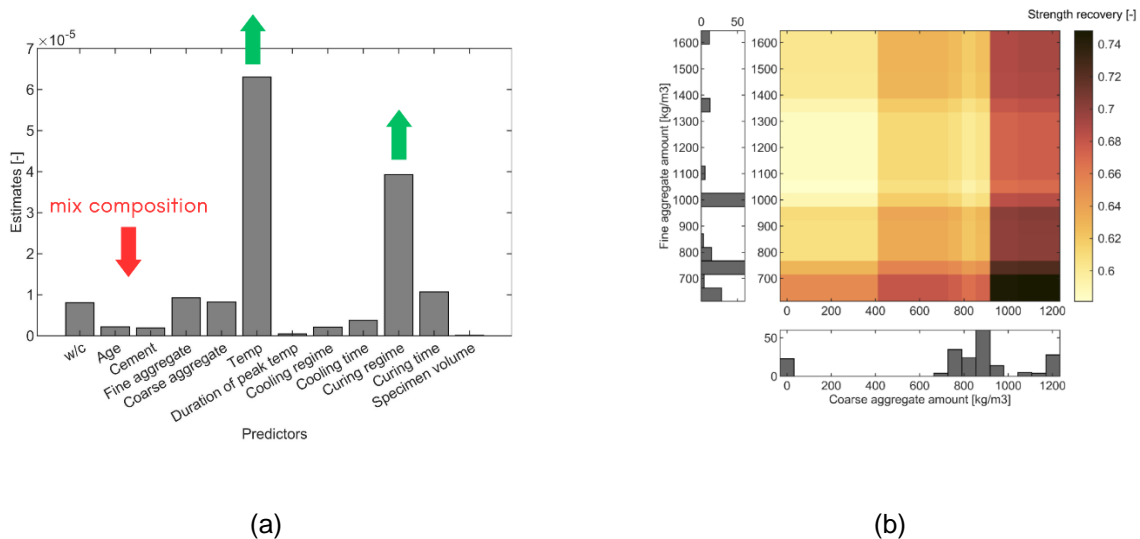
Mekaniskt spruckna prover utvärderades också i halvskala. Bascement testades som den mest lovande lösningen från initiala studier. Härdning efter brand applicerades både på de horisontella och vertikala ytorna med olika tekniker; partiell sprickförslutning observerades (Figur 9).



Figur 9. Halvskala – elementtestning (modifierad från Kothari et al. 2020).

Sprickor till följd av hög temperatur (brand)

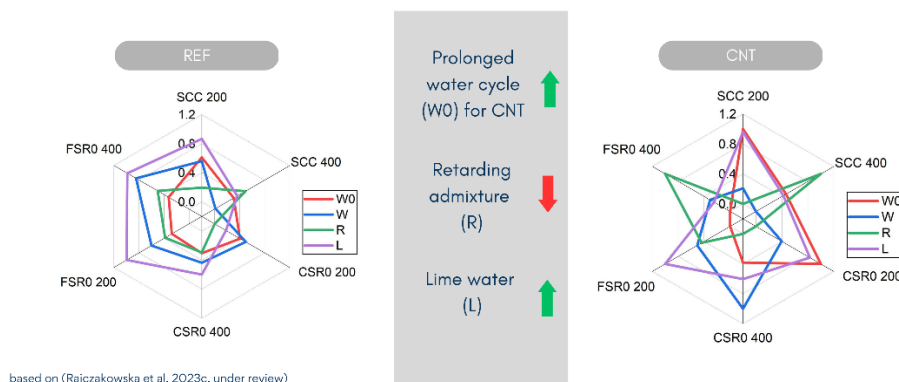
I fallet med sprickor vid höga temperaturer möjliggjorde maskininlärningsmodellering konstruktionen av hållfasthetsåtervinningsmodellen av termiskt skadad betong med dubbelt så god noggrannhet som linjär regression. Ensemble av regressionsträd med förstärkningsalgoritm fick lägst fel och träningstid. Utförd känslighetsanalys och tolkning av modellen med PDP- och ICE-plotterna påpekade vikten av laddningstemperaturen och härdningsbehandlingen på självläkningseffektiviteten (Figur 10a). Enligt modellen hade de bindemedelsrelaterade blandningskomponenterna en sekundär roll i processen; dock tog modellen inte hänsyn till SCM. Å andra sidan hade fina och grov ballast ett relativt betydande inflytande på hållfasthetsåterhämtningen, med CSR-förändringar mellan 0,61-0,69 respektive 0,62-0,72 (Figur 10b, Rajczakowska et al. 2023b). Effekten av fin ballast är negativ tills mängden är runt 1000 kg/m³ till skillnad från grov ballast.



Figur 10. (a) styrande faktorer för den självläkande effektiviteten av högttemperatursprickor, (b) förutspådd effekt av fina och grova ballast (modifierat från Rajczakowska et al., 2023b).

I experimentell studie, en ny möjlighet att förbättra självläkningen av termiskt skadad cementpasta genom att applicera MWCNTs och miljöstimulatorer (Figur 11). Fördröjande blandning främjade sprickförslutning för skador som inträffade vid en högre temperatur, särskilt i kombination med MWCNT. Det möjliggjorde dock inte återhämtningen av styrkan. Det kan vara kopplat till det skadade bindemedlets fördröjda rehydreringsreaktioner. Med tanke på övergripande självläkande prestanda, inklusive sprickförslutning och återhämtning av hållfasthet, presterade kalkvattenexponeringen bäst för både blandningar med och utan nanomaterial. Den möjliga orsaken kan vara kopplat till ett högre pH i spricklösningen; dock behövs mer bevis för att bekräfta detta förhållande. Långvarig vattenexponering i kombination med MWCNTs inuti cementpasta påverkade positivt återvinningen av tryckhållfasthet och sprickförslutning, särskilt för lägre temperaturbelastning. Därför kan det antas att den förlängda vättningsfasen aktiverar den ökande effekten av MWCNTs som hydratiseringspromotorer.

Sjävläkning av termiskt knäckt cementpasta var mer uttalad för högre temperaturer, förmodligen på grund av närvaron av ett sammankopplat mikrospricknätverk, vilket underlättade jonöverföringen från bindemedelsmatrisen in i sprickan. En betydande porositetsminskning efter läkning bidrog förmodligen till en utmärkt kompression. Hållfasthetsåtervinning, nå högre värden än de intakta proverna. Porerna var möjligen fyllda av de självläkande och rehydrerande faserna. Bildandet av självläkande faser observerades inuti sprickorna vid alla exponeringar. På ytan fanns i första hand kalcit, medan djupare inuti sprickan – C-S-H, ettringit och, vid fördröjande inblandning, kalciumfosfatföreningar.



Figur 11. Radardiagram över självläkande prestanda för olika kombinationer: (a) mix REF, (b) mix CNT. Data normaliseras av max- och minimivärdena för varje parameter. Större yta av tomten motsvarar en bättre självläkande prestanda (modifierad från Rajczakowska et al. 2023c).

Referenser

- Borg, R. P., Cuenca, E., Gastaldo Brac, E. M., & Ferrara, L. (2018). Crack sealing capacity in chloride-rich environments of mortars containing different cement substitutes and crystalline admixtures. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 7(3), 141-159.
- Kothari, A., Rajczakowska, M., Buasiri, T., Habermehl-Cwirzen, K., & Cwirzen, A. (2020). Eco-uhpc as repair material—bond strength, interfacial transition zone and effects of formwork type. *Materials*, 13(24), 5778.
- M. de Rooij, K. van Tittelboom, N. de Belie, E. Schlangen, *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*, Springer, 2013.
- Rajczakowska, M. (2023). Stimulated autogenous self-healing of mechanically and thermally cracked cementitious materials (Doctoral dissertation, Luleå University of Technology).
- 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. *Materials*, 12(23), 3926.
- 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, M., Szeląg, M., Habermehl-Cwirzen, K., Hedlund, H., & Cwirzen, A. (2022) Is Cement Paste Modified with Carbon Nanomaterials Capable of Self-Repair after a Fire?. *Nordic Concrete Research*, 67(2), 79-97.
- Rajczakowska, M., Szeląg, M., Habermehl-Cwirzen, K., Hedlund, H., & Cwirzen, A. (2023b). Interpretable Machine Learning for Prediction of Post-Fire Self-Healing of Concrete. *Materials*, 16(3), 1273.
- Rajczakowska, M., Tole, I., Hedlund, H., Habermehl-Cwirzen, K., & Cwirzen, A. (2023a). Autogenous self-healing of low embodied energy cementitious materials: Effect of multi-component binder and crack geometry. *Construction and Building Materials*, 376, 130994.
- Van Belleghem, B., Van den Heede, P., Van Tittelboom, K., & De Belie, N. (2016). Quantification of the service life extension and environmental benefit of chloride exposed self-healing concrete. *Materials*, 10(1), 5.