SBUF

PROJEKTNR. 13719

Varför kunskap om vatten är nyckeln till klimatförbättrad betong

Sammanfattning av doktorsavhandling

Liming Huang(1), Luping Tang(1), Ingemar Löfgren(1,2), Olsson Nilla(3)

1, Chalmers Tekniska Högskola, 412 96 Göteborg, Sverige
2, Thomas Concrete Group AB, Södra Vägen 28, 417 07 Göteborg, Sverige
3, NCC Sverige AB, 170 80 Solna, Sverige

2023-10-03

FÖRORD

Denna rapport är en kort sammanfattning av resultaten från projektet *Varför kunskap om vatten är nyckeln till klimatförbättrad betong.* Syftet med projektet är att öka kunskapen om kemiska och mikrostrukturella effekter av tillsatsmaterial i betong för att ge en säker användning av klimatförbättrad betong i Svenska byggbranschen. Hela arbetet är redovisat i doktorsavhandling, licentiatavhandling samt vetenskapliga publikationer.

Vi vill rikta ett stort tack till finansiärerna av detta projekt: FORMAS, Heidelberg Materials Cement Sverige AB, Thomas Concrete Group AB, samt Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond, (SBUF). Vi vill även rikta ett stort tack till referensgrupp och styrgrupp för diskussioner, åsikter och engagemang.

Malmö, oktober 2023

Nilla Olsson

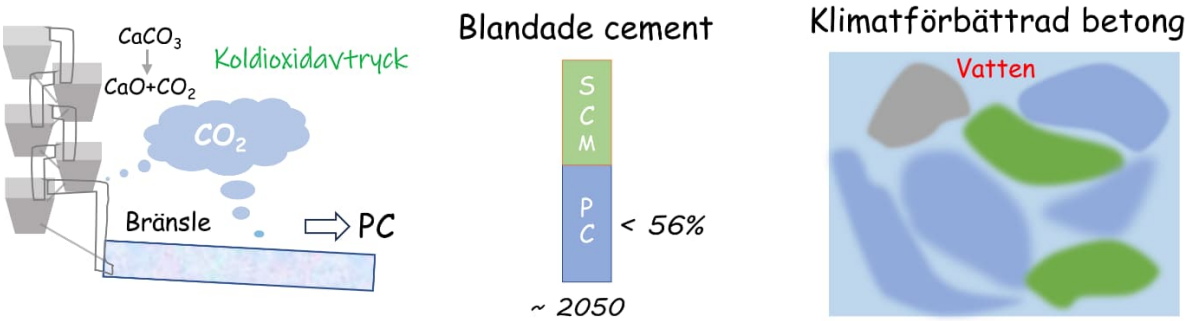
Projektledare

Sammanfattning

Alternativa bindemedel (”supplementary cementitious materials”, SCMs) erbjuder en hållbar lösning för att minska koldioxidutsläppen från produktionen av cement och betong. Denna studie utforskar påverkan av SCMs och relaterade tillsatser på hydratiseringsprocessen hos cementbaserade material, vilket påverkar deras mikrostruktur och transportegenskaper. Vatten är involverat i hela livscykeln hos cementbaserade material och avgör därigenom hydratiseringen, mikrostrukturen och beständigheten. Avancerade tekniker användes i studien för att undersöka mikrostrukturförändringar som induceras av SCMs och deras korrelation med transportegenskaper. En utrustning konstruerades för att kontinuerligt kunna övervaka effekten av SCMs på hydratisering, härdningsprocess och uttorkning av betong som innehåller SCMs. Den ger insikter i mekanismen för vattnets interaktion med grön betong och tillför en ny icke-destruktiv metod för att främja högkvalitativ användning av SCMs i klimatförbättrad betong.

Bakgrund

Betong är det grundläggande materialet för många konstruktioner och är därmed volymmässigt det i särklass mest använda fasta materialet i världen. Portlandcement (PC), som är det primära materialet i produktionen av betong, leder till stora utsläppa av koldioxid under dess tillverkning (se Figur 1), vilket bidrar med 7–8% av de antropogena koldioxidutsläppen (Shah et al., 2022). I dag är det mest genomförbara och mognaste sättet att minska utsläppen från cementproduktionen att delvis ersätta det med s.k. alternativa bindemedel (SCMs). För att nå nollutsläpp 2050, , krävs det att mängden klinker i cement minskas till mindre än 56 % och att 95 % av CO_2 från cementproduktionen fångas in och lagras (CCS), enligt en rapport från International Energy Agency (IEA, 2022).



Figur 1 Sammansättningen av klimatförbättrad cement och vattnets roll

SCMs har en betydande inverkan på hydratiseringen av vanligt portlandcement och mikrostrukturen hos härdad cementbaserad pasta, vilket i sin tur påverkar egenskaperna hos färsk betong (härdningstid och reologi), de härdade egenskaperna och därmed betongens beständighet. Hydratiseringen av cement blandad med SCM är en interaktion mellan vatten och dessa bindemedel. Denna

process innefattar lösligheten hos mineraler och den följande utfällningen av hydratiseringsprodukter från porlösningen (Scrivener et al., 2015; Scrivener, 2019). Vatten spelar en avgörande roll i reaktionen hos cementbaserade material. Det fungerar som en ”bärare” för att lösa upp joner från mineralytor och som en ”komponent” för att bilda den kemiska strukturen hos hydratiseringsprodukter (t.ex. kalciumsilikatahydrat, C-S-H). Fukttransportegenskaper spelar en avgörande roll för att bestämma prestandan hos cementbaserade material under byggprocessen och under långsiktig användning. Vid användning av traditionella metoder för att förutsäga rätt tidpunkt för att till exempel lägga golvbeläggningar på betong som innehåller SCM-material kan felaktiga prognoser leda till fuktrelaterade problem vilket kan utgöra en risk för människors hälsa.

Det är därför viktigt att undersöka interaktionen mellan vatten och cementbaserade material som är blandade med stora mängder av dessa SCMs. Detta bidrar till att förstå och kontrollera kvaliteten på blandade cement (BC), vilket hjälper till att främja användningen av SCMs av hög kvalitet i klimatförbättrad betong.

Syfte

I studien undersöktes 11 olika blandningar med SCMs, inklusive flygaska, slagg och kalksten. I binära system ersattes Portlandcement med 35 vikt-% flygaska eller slagg. I det ternära systemet ersattes Portlandcement med 35 % slagg och 16 % kalksten. Pastaproverna blandades till tre olika vatten-bindemedelstal (v/b), 0,35, 0,45 och 0,55, med ett undantag för flygaskapastor med endast två v/b (0,35 och 0,45). Det senare eftersom det kommer att vara sämre tillgång av flygaska i framtiden. För att uppnå en högkvalitativ och säker användning av klimatförbättrad betong fokuserades forskningen på följande områden:

(1) Utforska SCMs roll i mikrostrukturens utveckling under hydratiseringsprocessen av cementbaserade material genom icke-förstörande övervakningstester. Detta kommer att lägga en teoretisk grund för att förutsäga och utvärdera prestandan hos blandningssystemen vid olika mognadsgrader.

(2) Undersöka fuktupptagningen i den porösa strukturen hos härdad cementpasta. Analysera fuktfixeringen genom sorptionsmekanismer för att kvantifiera inflytandet av SCMs på den mikrostrukturella sammansättningen av blandningen.

(3) Utforska påverkan av SCMs på fukt- och jontransport i den härdade strukturen. Avslöja sambandet mellan transportegenskaper och porstruktur och slutligen identifiera de primära strukturella faktorer som påverkar fukt- och kloridjontransportegenskaper.

(4) Implementera de föreslagna icke-förstörande teknikerna för att övervaka bindetid samt härdnings- och torkningsprocesserna för klimatförbättrad betong,

samt bestämma kvantitativa samband mellan hållfasthet och elektrisk ledningsförmåga, och därigenom tillhandahålla effektiv teknologi för att säkerställa kvaliteten och säkerheten vid användningen av SCMs i modern byggnation.

Metodik

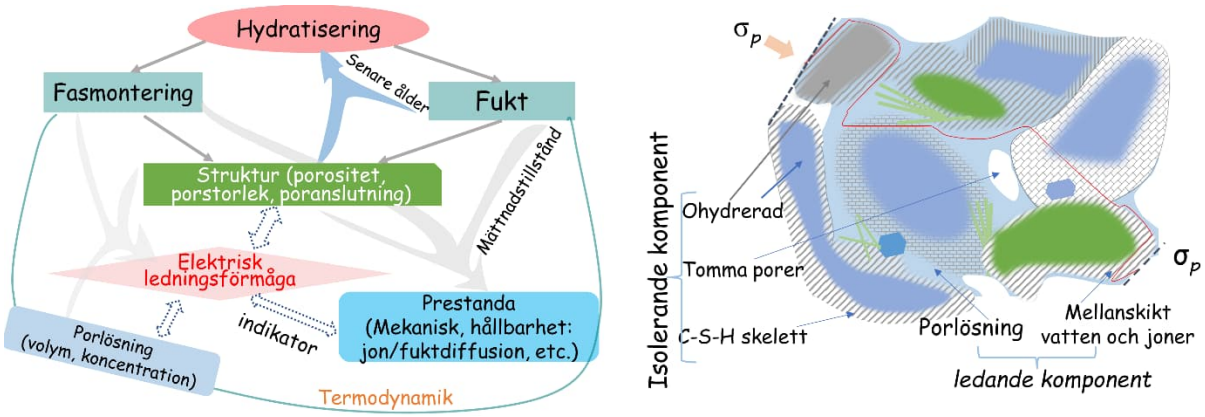
Avancerade testmetoder som kvicksilverintrångsporosimetri, kväveadsorption och dynamisk vattenångaisoterm användes för att undersöka effekten av SCMs på mikrostrukturen och fuktfixeringen av klimatförbättrad betong. Detaljer om dessa tester beskrivs i doktorsavhandlingen (Huang, 2023).

En ny icke-förstörande metod utvecklades för att övervaka hydratiseringen och strukturvecklingen av de blandade pastorna. En ny uppställning med tillhörande procedur föreslogs för att mäta fukttransporten i härdad cementpasta. Detaljer om dessa tester beskrivs i licentiatavhandlingen (Huang, 2022).

Utredningsresultat

Hydratisering, elektrisk ledningsförmåga och prestanda

Förändringen av elektrisk ledningsförmåga i pastan under hydratisering bestämdes av utvecklingen av de faktorer som visas i Figur 2. Hydratisering av mineraler ger en förändring av fasernas sammansättning och intern fuktighet, vilket samtidigt bildar pastans struktur. Som nu är allmänt erkänt (Scrivener et al., 2019), påverkar tillgängligheten av fukt och porfördelning i pastan i sin tur hydratisering i senare åldrar. Volymen och jonkoncentrationen i porlösningen relaterades till fasernas sammansättning och fuktighetsinnehåll genom termodynamiska lagar. Förutom pastans sammansättning är porlösningens konnektivitet den andra faktorn som påverkar den elektriska ledningsförmågan i pastor. Mekaniska egenskaper och hållbarhet hos cementbaserade material bestäms av dess fasers sammansättning, mikrostruktur och mättnadsgrad.



Figur 2 Korrelation mellan vattenstyrda reaktioner, mikrostruktur, elektrisk ledningsförmåga och prestanda hos klimatförbättrad betong

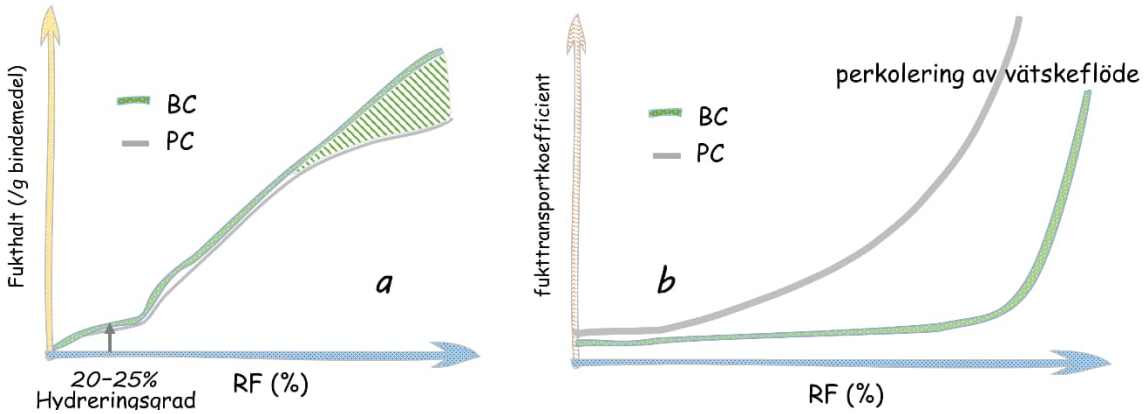
När det gäller elektrisk ledningsförmåga kan pastan klassificeras i två faser. Den består av fasta partiklar och flytande porlösning. Ledningsförmågan hos fasta partiklar är cirka 1×10^{-8} mS/cm (Rajabipour and Weiss, 2007), vilket är långt mindre än den typiska jonledningsförmågan hos porlösningen (σ=10–200 mS/cm). Den ökade utfällningen av hydratiseringsprodukter (huvudsakligen kalciumsilikatahydrat, C-S-H) kommer att skapa förbindelser mellan partiklarna, så den aktuella vägen blir mycket mer krokig (röd linje i den hydratiserade pastan) när hydratiseringen fortskrider. Minskningen i volymen av porlösningen orsakar förändringar i jonledningsförmågan. Därför kan tillväxthastigheten för elektrisk ledningsförmåga indikera tillväxthastigheten för hydratiseringsprodukter indirekt men effektivt.

Fuktfixering och transport

Fuktbindning och transportegenskaper spelar avgörande roller för att bestämma prestandan hos cementbaserade material under byggprocessen och under långsiktig användning. Fuktnivåerna i betongsubstratet innan något täckande material appliceras är direkt kopplade till risken för fuktskador. Fukt påverkar också transporten av CO_2, O_2 och kloridjoner i betong, vilket slutligen avgör nedbrytningsprocessen hos armerade betongstrukturer.

I denna forskning har det konstaterats att blandningen av SCMs kommer att ändra den hårda cementpastas beteende med avseende på vattenångsorption beroende på deraspåverkan på mikrostrukturen. Ökningen av fukthalt i de blandade pastorna inträffar huvudsakligen vid RF över 40 % när v/b ökar till mer än 0,45 (se referens (Huang et al., 2023) och illustrationen i Figur 3a). En liknande företeelse har rapporterats av Olsson et al. (Olsson et al., 2018) i desorptionsdata för väl hydratiserade (vattenhärdning i 4 år) pastor som blandats med slagg. Fuktighetssorptionsdata är mycket användbara för att beräkna porstorleksfördelning i mesoskalan. Mängden fuktighet vid 20–25 % RF indikerar

mängden C-S-H, vilket kan användas för att utvärdera hydratiseringsgraden genom att kombinera användningen av termodynamisk modellering (Huang, 2023).



Figur 3 Illustration av skillnaden i fuktavdunstning och transport mellan de blandade cement (BC)- och Portlandcement (PC) pastorna

Fukttransport i cementbaserade material involverar transport av både gas (ånga) och vätskefaser under omättade förhållanden. Dominansen av någon av processerna beror på mättnadstillståndet. Innan vätskefasen uppnår perkolation (kontinuerlig vätskefas) vid det kritiska RF-tillståndet, domineras fukttransportprocessen av ångdiffusion. Å andra sidan är Darcians transport av vätskefasen framträdande efter perkolation, vilket resulterar i särskilt höga transportkoefficienter (Huang et al., 2022). Därför har den uppmätta ångdiffusionen en RF-beroende utveckling, som visas i Figur 3b. Närvaron av SCMs kommer att inducera förfining av porstrukturen, så perkolationen av vätska i blandade cement (BC) kräver en högre RF jämfört med Portlandcement (PC). Effekterna av SCMs på både fuktfixering och transport inför ytterligare komplexitet i förutsägelsen av fuktprofiler under torkningsprocessen av klimatförbättrad betong. Det är därför mycket nödvändigt att utveckla en ny metod för att övervaka hydratisering och torkning av den nya generationen av betong.

Ny metod för att övervaka vattnet i betong

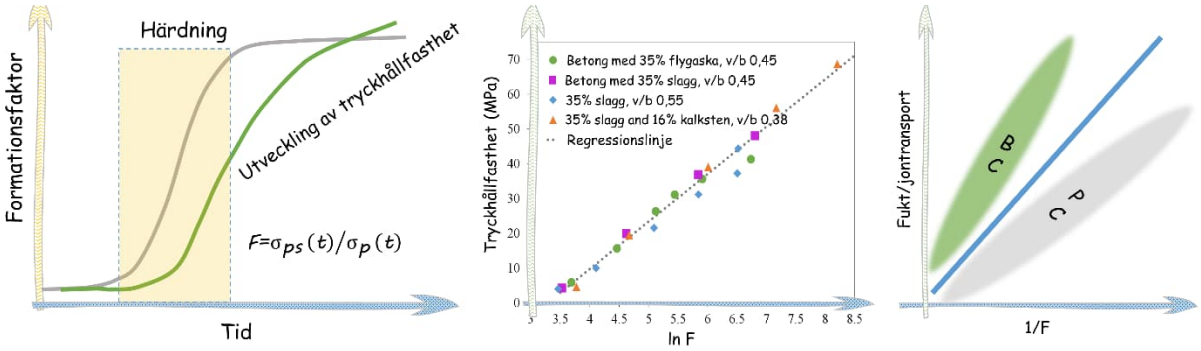
Joner i lösning är grunden för strömöverföring genom cementbaserade material. Under hydratiseringsreaktionen övergår vattnet från ett fritt tillstånd till ett kemiskt bundet tillstånd, vilket minskar mängden av avdunstningsbart vatten och minskar därmed även konnektiviteten och konduktiviteten hos porlösningen.

Elektrisk ledningsförmåga hos cementbaserade material bestäms av både den joniska ledningsförmågan hos porlösningen och matrisens porstruktur. Formationsfaktor (F) användes för att skilja effekten av mikrostrukturen och porlösningen genom definitionen med Ekvation 1 (Moradllo, 2018; Tumidajski et al., 1996):

$$F=\frac{\sigma_{ps}(t)}{\sigma_{p}(t)} \qquad (1)$$

där $\sigma_p(t)$ är ledningsförmågan hos mättade cementbaserade material, $\sigma_{ps}(t)$ är ledningsförmågan hos porlösningen och t är härdningstiden. $\sigma_p(t)$ erhålls genom den icke-förstörande övervakningsmetoden. Ledningsförmågan hos porlösningen kan uppskattas utifrån bindemedlens kemiska sammansättning och mängden av avdunstningsbart vatten.

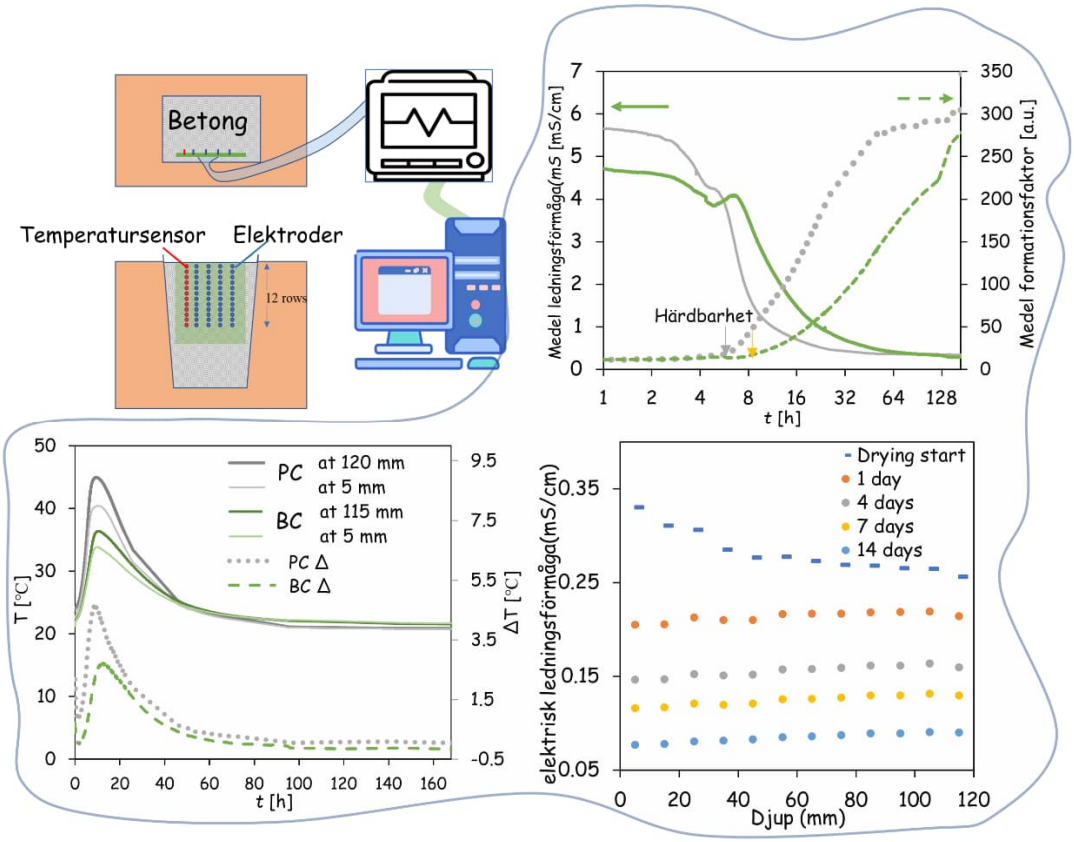
Det upptäcktes att den övervakade formationsfaktorn är mycket användbar för att indikera betongens härdning. Som visas i figur 4, kommer formationsfaktor att ha en plötslig ökning på grund av att konnektivteten hos den fasta fasen, inflexionspunkten korrelerar med betongens slutliga bindestid. Logaritmen av formationsfaktorn kan väl beskriva den tryckhållfasthet som utvecklas i klimatförbättrad betong. Joners diffusivitet i porösa material korrelerar med F och elektrisk ledningsförmåga. De i realtid övervakade elektriska egenskaperna är effektiva för att indikera kloridmigrationskoefficienten i härdad pasta. $1/F$ kan användas för att beräkna kloridmigrationskoefficienten för klimatförbättrad betong, inklusive effekten från SCMs och bindning-/härdningstid. Betongens fukttransportegenskaper är beroende av RF. Vid högt RF-intervall presterar $1/F$ väl när det gäller att beskriva fukttransporten i både blandcement- och rena Portlandcement-pastor. Vid lågt RF-intervall har korrelationen mellan fukttransportkoefficient och $1/F$ för blandcement-pasta en högre lutning än för Portlandcement-pasta, som visas i figur 4. Generellt sett är de övervakade data mycket meningsfulla för att indikera härdbarhet och masstransport i klimatförbättrad betong.



Figur 4 Bildningsfaktor används för att indikera betongens härdbarhet, hållfasthetsutveckling och masstransport

Övervakningssystemet uppgraderades för att mäta den elektriska ledningsförmågan hos hydratiserande betonger på olika djup med automatisk styrning för att undvika polarisation och störningar mellan skikten. Som Figur 5 visar kan den uppgraderade versionen inte bara erhålla ett tillförlitligt värde genom att ta medelvärdet av data på olika djup, utan också ta hänsyn till temperaturpåverkan med hjälp av ytterligare temperatursensorer på varje djup. Detta är också användbart för att indikera temperaturskillnaden mellan inre och yttre delar för att kontrollera risken för termisk sprickbildning i massiva betongkonstruktioner. Förändringen av ledningsförmågans profil under

torkningsprocessen kan övervakas av det uppgraderade systemet. Funktionen för denna utrustning för övervakning av torkningsprocessen utreds inom ramen för det pågående SBUF-projektet (14112).



Figur 5 Den uppgraderade enheten som används för att övervaka härden och torkningen av betong

Slutsatser

Vatten är involverat i hela livscykeln för cementbaserade material och påverkar därmed betongens hydratisering, mikrostruktur och beständighet. Den nyutvecklade utrustningen visar utmärkt prestanda när den övervakar interaktionen mellan vatten och klimatförbättrad betong. SCMs påverkar inte bara porstrukturen i härdad cementbaserad pasta, utan också fassammansättningen och vattendynamiken. Effekten av SCMs på meso-skalig porstruktur kan tydligt indikeras av vattenångsorptionsisotermer.

Fukttransporten i blandade bindemedelssystem kommer att påverkas av SCMs på grund av deras förfining av porstrukturen, vilket kan indikeras av formationsfaktor. En förenklad modell baserad på formationsfaktor kan användas för att uppskatta kloridmigrationskoefficienten för de blandade pastorna och murbruken. Den uppgraderade utrustningen erbjuder en pålitlig icke-destruktiv övervakning av betongkvaliteten genom att mäta elektrisk ledningsförmåga och intern temperatur noggrant. Den har också potential för att övervaka torkningsprocessen av klimatförbättrad betong.

Framtida forskning

Karbonatisering av betong kan binda in koldioxid genom att fånga och permanent lagra koldioxid från atmosfären. Detta är fördelaktigt för att minska utsläppen av växthusgaser och mildra klimatförändringar. Emellertid sänker karbonatisering vanligtvis pH-värdet i betong, ändrar fassammansättningen och mikrostrukturen. När pH sjunker under en viss tröskel kan betongen tappa förmåga att skydda ingjuten stålarmering från korrosion. Fukt styr denna elektrokemiska korrosionsprocess och vatten är också avgörande för rörelsen av joner, såsom kloridjoner, som kan påskynda korrosionen. Kombinationen av karbonatisering och fukt kan öka risken för korrosion avsevärt och i slutändan äventyra betongens strukturella integritet. Därför är det mycket viktigt att utforska:

- Den utvecklade utrustningens funktion i övervakningen av karbonatisering och korrosion av klimatförbättrad betong
- Fuktfixering och transport i karbonatiserad klimatförbättrad betong blir ett mer betydande vetenskapligt problem jämfört med Portlandcement-betong

Referenser

Huang, L., 2023. Interaction of water with supplementary cementitious materials: Hydration mechanism, microstructure and moisture transport (PhD thesis). Chalmers Tekniska Hogskola, Gothenburg, Sweden.

Huang, L., 2022. Water and alkali salts in the hydrating and hardened green cement-based materials: Hydration process, moisture content and transport (Licentiate thesis). Chalmers Tekniska Hogskola, Gothenburg, Sweden.

Huang, L., Tang, L., Löfgren, I., Olsson, N., Yang, Z., Li, Y., 2022. Moisture and ion transport properties in blended pastes and their relation to the refined pore structure. Cement and Concrete Research 161, 106949.

Huang, L., Tang, L., Wadsö, L., Löfgren, I., Olsson, N., Yang, Z., 2023. Using water vapour and N2 isotherms to unveil effects of SCMs on nanopores and evaluate hydration degree. Cement and Concrete Research 164, 107042.

IEA, 2022. World Energy Outlook 2022. France, Paris.

Moradllo, M.K., 2018. Relating Formation Factor of Concrete to Water Absorption. ACI Materials Journal 13.

Olsson, N., Nilsson, L.-O., Åhs, M., Baroghel-Bouny, V., 2018. Moisture transport and sorption in cement based materials containing slag or silica fume. Cement and Concrete Research 106, 23–32.

Rajabipour, F., Weiss, J., 2007. Electrical conductivity of drying cement paste. Mater Struct 40, 1143–1160.

Scrivener, K., Ouzia, A., Juilland, P., & Mohamed, A. K., 2019. Advances in understanding cement hydration mechanisms. Cement and Concrete Research 124, 105823.

Scrivener, K.L., Juilland, P., Monteiro, P.J.M., 2015. Advances in understanding hydration of Portland cement. Cement and Concrete Research 78, 38–56.

Shah, I.H., Miller, S.A., Jiang, D., Myers, R.J., 2022. Cement substitution with secondary materials can reduce annual global CO_2 emissions by up to 1.3 gigatons. Nature Communication 13, 5758.

Tumidajski, P.J., Schumacher, A.S., Perron, S., Gu, P., Beaudoin, J.J., 1996. On the relationship between porosity and electrical resistivity in cementitious systems. Cement and Concrete Research 26, 539–544.