

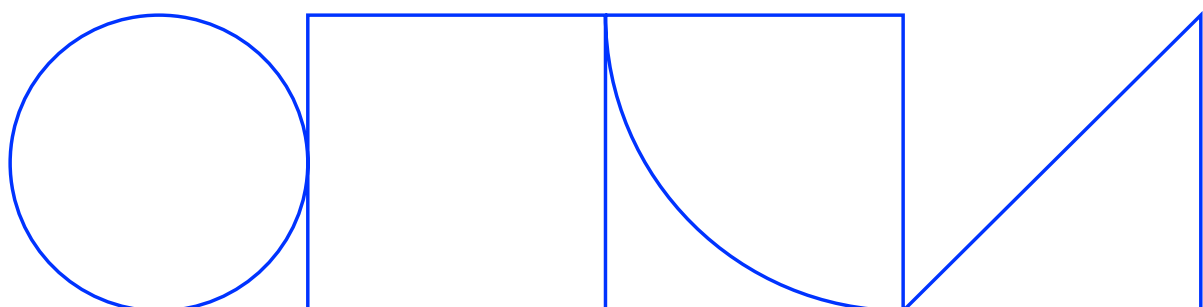
SmartCemHumid - Nya multifunktionella fuktsensorer för betong

Slutrapport

Andrzej Cwirzen¹, Thanyarat Buasiri¹ and Hans Hedlund^{1, 2}

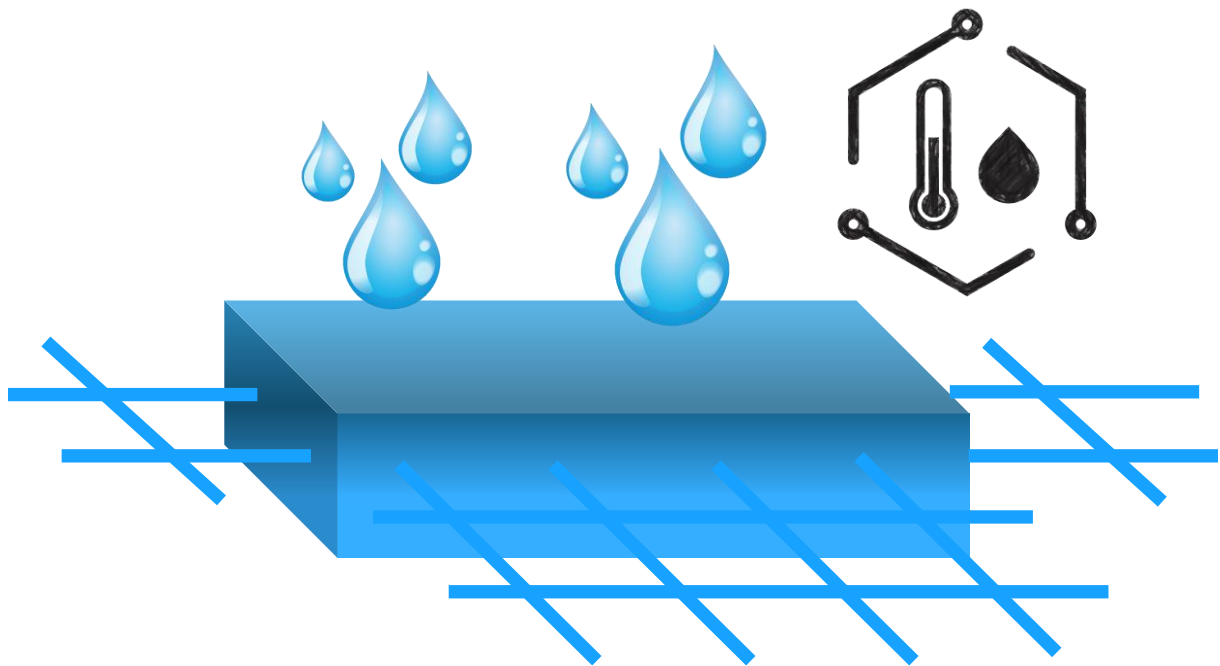
1. LTU, 2. Skanska

2024-12-15



SBUF 14018

SmartCemHumid – nya multifunktionella fuktsensorer för betong



Andrzej Cwirzen, Thanyarat Buasiri and Hans Hedlund
Luleå, 2024-12-15

Förord

Projektets arbetsgrupp vill rikta ett stort tack till samtliga branschrepresentanter som deltog i arbetet med både sin tid, energi, idéer, branschkunskap och erfarenhet, och ett mer specifikt tack till referensgruppen:

- Nilla Olsson, NCC,
- Staffan Carlström, Swerock,
- Anders Selander, Heidelberg Material – Cement,
- Giedrius Zirgukis, RISE
- Marcus Olovsson, Nåiden Bygg
- Hans Hedlund, Skanska

Därtill vill vi rikta ett specifikt tack till Marcus Olovsson, Nåiden Bygg AB, för tillgång till byggprojekt för fältnätningar.

Författarna vill uttrycka sin uppriktiga tacksamhet till Svensk Byggbranschens Utvecklingsfond (SBUF) och Skanska Sverige AB för deras generösa stöd. Det ekonomiska bidraget har varit ovärderliga för genomförandet av detta arbete, och vi uppskattar djupt ditt engagemang för att främja detta projekt. Tack för ert förtroende och stöd.

Projektets arbetsgrupp vill slutligen rikta ett stort och varmt tack till SBUF och Skanska Sverige AB och LTU för stöd och finansiering av detta projekt.

Sammanfattning och slutsatser

Det slutliga målet med detta forskningsprojekt var att installera och testa SmartCem sensorbaserade övervakningssystem på en fullskalig betongkonstruktion, med särskilt fokus på övervakning av temperatur och fukt. Innan detta påbörjades fokuserade forskningsaktiviteterna på att samla in data för att bättre förstå responsmekanismer och för att ta fram modeller som möjliggör analys och tolkning av insamlade data. Aktiviteterna inkluderade även utformning av installationstekniker för SmartCem-sensorerna och datainsamlingssystem.

Resultaten visade att en partiell ersättning av Portlandcement med det nanomodifierade SmartCem (Portlandcement med in situ-syntetiserade kolnanofibrer) möjliggjorde produktionen av murbruk med självdiagnostiserande egenskaper. Sensorerna kunde mäta förändringar i fuktighet och temperatur. Det fanns en god korrelation mellan de data som samlades in i laboratoriet och på den fullskaliga betongplattan gällande temperaturen av Portlandcement. Det installerade systemet kommer att vara i drift under en längre period.

- Multifunktionella sensorerna med förmåga tillhandahåller fukt-data i realtid och stöder tidig identifiering av fuktrelaterade problem som kan äventyra konstruktionens beständighet, inklusive krympning, sprickbildning och korrosion av ingjuten armering.
- SmartCemHumid-systemets fuktavkännande egenskaper, tillsammans med dess multifunktionalitet, har positiv inverkan för fuktsäkerhet i byggandet och förvaltning av byggnader.

Summary and Conclusions

This project aimed to install and test the SmartCem sensors-based monitoring system on a full-scale concrete structure, specifically on hydration and humidity monitoring. Before that, the research activities focused on collecting data required to understand response mechanisms better and to derive models enabling analysis and interpretation of collected data. Activities included the design of installation techniques for SmartCem sensors and data collection systems.

The results showed that a partial replacement of Portland cement with the nanomodified SmartCem (Portland cement with in-situ synthesized carbon nanofibers) enabled the production of mortars with self-sensing properties. Sensors could measure changes in humidity and the hydration process. There was a good correlation between the data collected in the laboratory and on the full-scale slab and in comparison, with reference techniques.

- The multifunctional sensors with the capability provide real-time moisture data and support early identification of moisture-related problems that can compromise the durability of the structure, including shrinkage, cracking and corrosion of embedded reinforcement.
- The moisture-sensing properties of the SmartCemHumid system, together with its multifunctionality, have a positive impact on moisture safety in construction and building management.

Innehåll

1	BAKGRUND	5
2	MÅL OCH SYFTE	6
2.1	Mål	6
2.2	Syfte	6
2.3	Avgränsning	6
3	PROJEKTÖVERSIKT	6
4	MATERIAL OCH METODER	7
4.1	SmartCemHumid-system	7
4.2	Laboratorier tester – småskaliga prov	9
4.3	Laboratorier tester - halvskala	10
4.4	Fullskalig testning - Fältnätning	11
5	RESULTAT	13
5.1	Laboratorier tester – småskaliga prov	13
5.2	Laboratorier tester – halvskala	14
5.2.1	Effekter av SmartCem-sensors placering	15
5.2.2	Effekter av formmaterial	15
5.2.3	Elektrisk resistivitet vs. temperaturutveckling	16
5.3	Fullskalig testning - Fältnätning	16
5.4	Modellering	19
5.5	Ekonomiska aspekter	20
6	RESULTATSPRIDNING	21
7	SLUTSATSER	21
8	REFERENSER	22

1 Bakgrund

Mätning av relativ fuktighet (RH) i betong är viktig för entreprenörer och fastighetsägare, eftersom fuktnivåer avsevärt påverkar såväl boendemiljö som prestanda, hållbarhet och livslängd hos betongkonstruktioner. Betongens porösa mikrostruktur gör att den absorberar, håller kvar och släpper ut fukt, vilket påverkar bland annat kritiska egenskaper som hållfasthet, funktion, stabilitet och sprickbildning. Dessutom påverkar hydratationsprocessen i stor utsträckning uttorkningshastigheten. Denna uttorkningstid är viktig för planering av byggprocessen, inklusive till exempel installation av isolering och ytskikt på golv och bjälklag. Således ger mätning av relativ fuktighet (RF alt. RH (eng.)) ingenjörer insikter i fuktdynamik, vilket gör att de kan förfinna härdning och efterbehandling, kontrollera miljöförhållanden för att hantera fuktexponering och utveckla strategier för att bevara såväl strukturell hälsa som en god inomhusmiljö. Dessutom hjälper proaktiv RH-övervakning till att förebygga nedbrytning, vilket säkerställer att betongkonstruktioner förblir säkra och hållbara under hela sin livslängd.

De första fuktsensorerna för betong utvecklades i början av 1900-talet och de första dokumenterade mätningarna gjordes 1940 (Gause och Tucker 1940). Termohygrometriska sonder som mäter relativ fuktighet och temperatur installerades i hålrum som borrades i den testade betongen 1999 (Loukili, Khelidj och Richard 1999) (Andrade, Sarría och Alonso 1999). Den största nackdelen med denna metod är den begränsade diffusiviteten av fukt i tätare betong, (Nilsson 2002). En annan felkälla är också en temperaturgradient mellan övervakad betong och uteluft. Det uppmätta felet kan nå så mycket som 5 % RH med 1°C. Kapacitiva sensorer verkade ge färre fel i jämförelse med de termohygrometriska sensorerna och deras rapporterade noggrannhet var ± 2 % RF mellan 10 och 90 % RF (Grasley och Lange 2004). En långsam respons av denna typ av sensorer vid högre RH-nivåer rapporterades som ett av huvudproblemen i vissa tillämpningar (Jensen och Hansen 1999). Det senaste decenniet har levererat flera nya lösningar inklusive till exempel fuktsensorer baserade på en kombination av mikroelektromekaniska system och nanoteknik (Norris, Saafi och Romine 2008). Dessa system använde mikro-balkar och fuktkänsliga tunna polymerer och kunde mäta både temperatur och fukt. Ett nytt tillvägagångssätt utvecklat vid LTU och som testades i detta projekt, använder en hårdnad bindemedelsmatris som en fuktsensor. Ett exempel på förtillverkad sensor och mätprincip visas i Figur 1. Lösningen är baserad på applicering av nanomodifierad cement som innehåller applicerade in situ på cementpartiklar Carbon Nano Fibers (CNF), (Buasiri 2023).



Figur 1. Mätprincip och färdig att installera prototypsensor.

Studien inkluderade laborietestning, modellering och fullskalig tillämpning.

2 Mål och syfte

2.1 Mål

Målet var att tillhandahålla pålitliga, lättinstallerade fuktgivare som är helt integrerade med betong och erbjuder ytterligare funktioner som är väsentliga för entreprenörens dagliga betongarbeten och avgörande för konstruktionens långsiktiga prestanda. Dessa funktioner inkluderar övervakning av värmeutvecklingen i ung hårdnande betong, övervakning av fukt/uttorkning och ett varningssystem för skadlig nedbrytning.

2.2 Syfte

Projektet avser att undersöka följande frågeställningar:

- Hur noggrann är övervakningen av härdningsprocessen (hydratationsvärme) med SmartCem-sensorer i jämförelse med befintliga kommersiellt tillgängliga system?
- Vilken noggrannhet kan uppnås med SmartCem-sensorer för att bedöma hållfasthetsutvecklingen och formrivningstid för konstruktionsdelar i full skala?
- Hur ska sensorer installeras (placeringar och orienteringar) i fullstora element?
- Hur ska sensorer integreras i nya strukturer/element?
- Hur kan datainsamlingssystemen integreras i den övervakade konstruktionen och hur kan den drivas?

2.3 Avgränsning

Avgränsningar i projektet:

- Endast en typ av SmartCem-sensor (S8) testas vid både semi-storskaliga och fullskaliga tester på grund av perkolationströskeln* för SmartCem-sensorn som svar på fuktighetsvariationer.
- Fullskaliga övervakningstester på plats pågår fortfarande när denna rapport skrivs, därför presenteras endast ett fåtal resultat.

**Perkolationströskeln är ett matematiskt begrepp inom perkolationsteorin som beskriver bildandet av långdistansanslutningar i slumpmässiga system. Under tröskeln existerar inte en gigantisk ansluten komponent medan ovanför tröskeln finns en gigantisk komponent i storleksordningen av systemet.*

3 Projektöversikt

Projektet startade med ett teoretiskt arbete fokuserat på att utveckla installationsmetoder för övervakningssystemet, med hjälp av SmartCem-sensorn (WP1). Lösningarna som undersöktes i denna fas syftade till att säkerställa korrekt placering av sensorerna i ett betongtvärsnitt, med hänsyn till både placering och orientering.

Därefter designades och testades SmartCemHumid-systemet i laboratoriemiljö (WP2). Detta steg innebar att integrera viktiga komponenter som datainsamling och strömförsörjningssystem för att säkerställa systemets funktionalitet och tillförlitlighet. Tester i laboratoriemiljö gav en möjlighet att validera systemets prestanda under kontrollerade förhållanden, simulera olika miljöfaktorer.

En nyckelkomponent i projektet var installationen av SmartCemHumid-systemet på den nya betongkonstruktionen i Kalix, (WP3). Integreringen av systemet i plattan under byggnationen

säkerställde också en långsiktig övervakning och bedömning av fuktnivåer i betongkonstruktionen över tid.

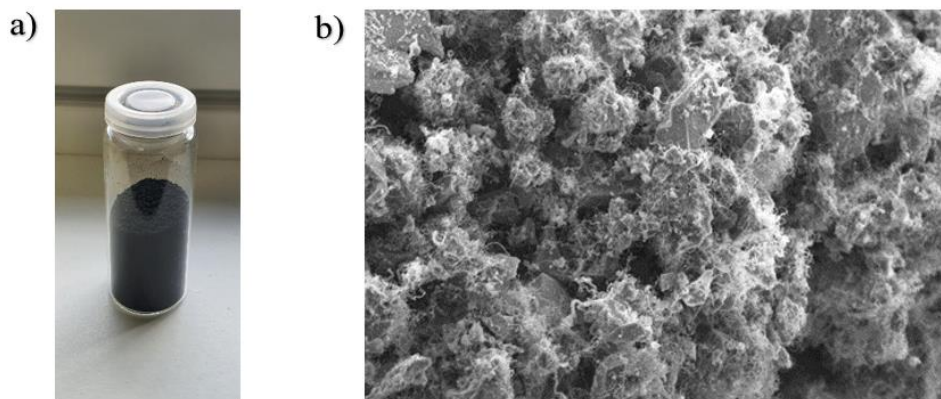
Efter datainsamling från fältmätningar i Kalix (Byggprojekt, Nåiden), tillsammans med data som erhållits i laboratoriet, genomfördes en grundlig analys i WP4. Denna fas fokuserade på att utvärdera noggrannheten och tillförlitligheten av SmartCemHumid-systemets mätningar, samt att modellera mätmekanismerna baserat på insamlade data. Analysen bidrog till en djupare förståelse av hur luftfuktighet beter sig inom konkreta och informerade potentiella förbättringar av systemets prestanda.

Slutligen undersöktes kortfattat ekonomiska överväganden för SmartCemHumid-systemet (WP5).

4 Material och metoder

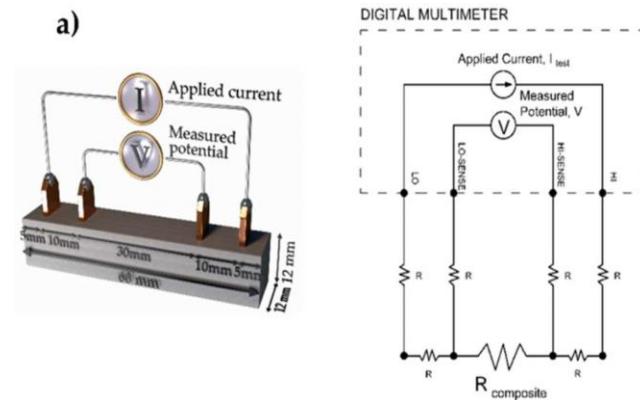
4.1 SmartCemHumid-system

SmartCem-sensorerna som användes i detta projekt var gjorda av bruk blandade under vakuum, med ett vatten-till-bindemedelsförhållande (w/b) lika med 0,35 och ett sand-till-bindemedelsförhållande (s/b) på 1. En polykarboxylatbaserad superplasticerare (flytmedel) tillsattes med 0,8 vikt-%. SmartCem-materialet bestod av cementpartiklar med kolnanofibrer (CNF) syntetiserade in situ via metoden kemisk ångdeposition (CVD). De uppskattade mängderna CNF på cementpartiklarna motsvarade ungefär 2,71 vikt-%. De bildade CNF:erna hade en ”vågig/lockig” morfologi med diametrar från 10 till 50 nm och längder mellan 3 μm och 20 μm , som ses i Figur 2.



Figur 2. SmartCem-material a) SmartCem som producerat och b) SEM-bild av SmartCem-partiklarna

SmartCem-innehållet varierade från 0 vikt-% (Ref), 2 vikt-% (S2), 4 vikt-% (S4), 6 vikt-% (S6), 8 vikt-% (S8) och 10 vikt-% (S10) med den totala bindemedelsvikten. Varje sensor hade måtten 60x12x12 mm och var ansluten till övervakningssystemet med 4-givarmetoden, Figur 3. Likström applicerades mellan de två yttre elektroderna och potentialen mättes mellan de två inre elektroderna. Avståndet mellan de inre elektroderna var 30 mm och avståndet mellan de yttre elektroderna var 50 mm. Mätningarna utfördes med en digital multimeter av typen Keysight 34465A.



Figur 3. Givarmått och anslutningslayout till övervakningssystemet

Fuktighetsavkänning innebär att övervaka förändringar i de elektriska egenskaperna hos ett material som svar på variationen i luftfuktighet. De typer av avkänningssignaler som används för att mäta dessa elektriska egenskaper beror på de valda metoderna och utrustningen. I detta projekt är de elektriska egenskaperna som beaktas elektrisk resistivitet och elektrisk konduktivitet, som kan beräknas med hjälp av följande ekvationer.

Elektrisk resistivitet beräknas vanligtvis med formeln:

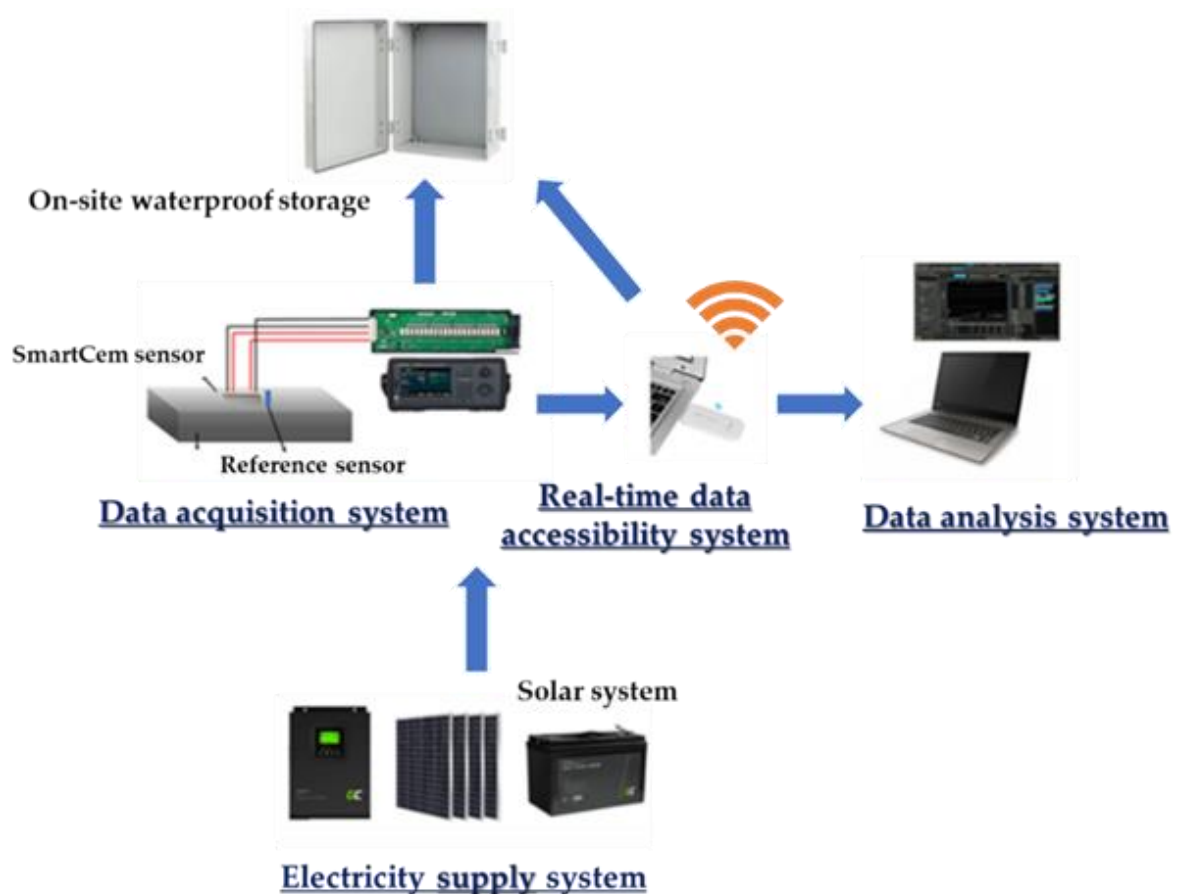
$$\rho = \frac{RA}{L}$$

Elektrisk ledningsförmåga är helt enkelt motsatsen till resistivitet:

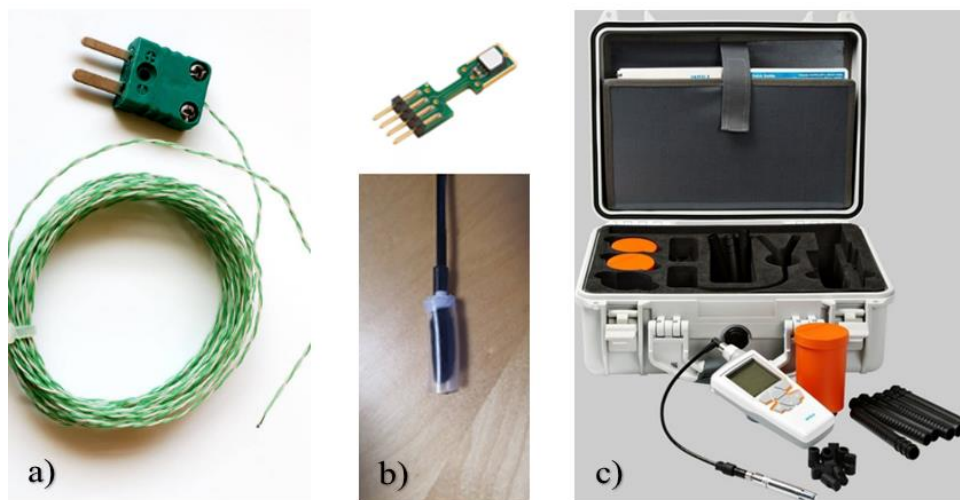
$$\sigma = \frac{L}{RA} = \frac{1}{\rho}$$

där: ρ är den elektriska resistiviteten (mätt i ohm-meter, $\Omega \cdot m$), σ är den elektriska ledningsförmågan (i siemens per meter, S/m), R är uppmätt elektrisk resistans för kompositen (i ohm, Ω), A är elektrodens tvärsnittsarea (i kvadratmeter, m^2) och L är inre elektrodavstånd (i meter, m)

Den kompletta designen av SmartCemHumid-systemet bestod av fyra huvudkomponenter: datainsamlingssystemet, realtidstillgänglighetssystemet, strömförsörjningssystemet och dataanalyssystemet, som illustreras i Figur 4. Referenssensorer, inklusive ett termoelement och fuktsensorer (Figur 5), var inbäddade nära SmartCem-sensorn. Två typer av kommersiella fuktsensorer användes som referenspunkter, som var och en tjänar ett annat syfte. Fuktsensorn SHT85, tillverkad av Sensirion, var inbäddad för att övervaka hydrering och fuktighet under de tidiga stadierna av betonghärdning, medan SHM-40 fukttestkit från Vaisala användes för att övervaka fuktighet med borrhålsmetoden i senare skeden (efter 7 dagar).



Figur 4. SmartCemHumid system

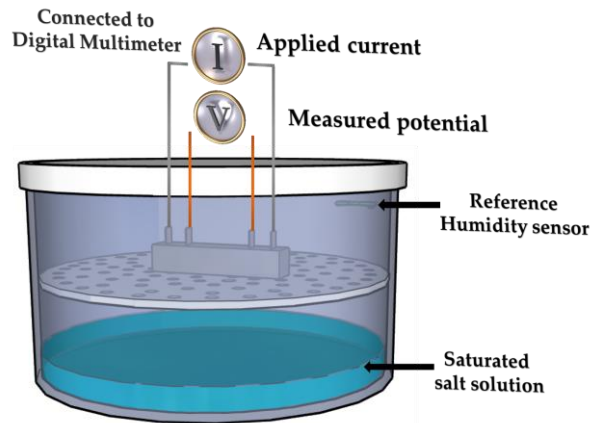


Figur 5. Referenssensorer a) Termoelement b) SHT85 fuktsensor och c) SHM40 fuktsensorkit.

4.2 Laboratorier tester – småskaliga prov

Effekterna av olika luftfuktighetsnivåer på den elektriska resistiviteten hos SmartCem-sensorer utvärderades i liten skala. Anpassade fuktkammare förbereddes för att studera de fuktkänsliga egenskaperna hos SmartCem-sensorer. Dessa kammare bestod av förseglade glasbehållare med olika mättade saltlösningar, inklusive litiumklorid (LiCl), kaliumkarbonat (K_2CO_3), natriumklorid (NaCl) och kaliumsulfat (K_2SO_4), som bibehöll en relativ luftfuktighet på 11%,

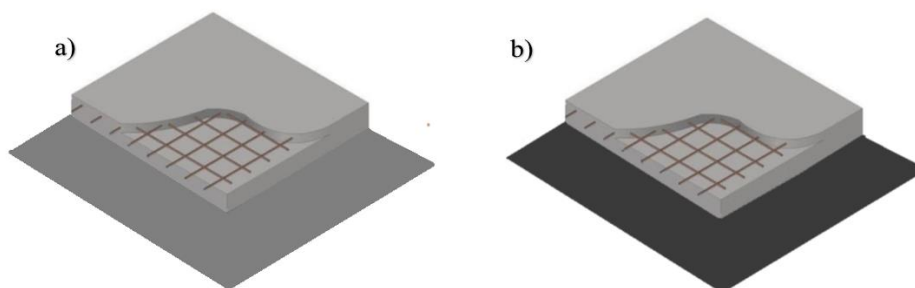
43%, 75 % respektive 97 %. En kommersiell SHT85 fuktsensor från Sensirion installerades i varje kammare som referens. Efter 28 dagar placerades SmartCem-sensorer i de kontrollerade fuktkamrarna, och det elektriska motståndet mättes efter 24 timmar. Den experimentella uppställningen visas i Figur 6.



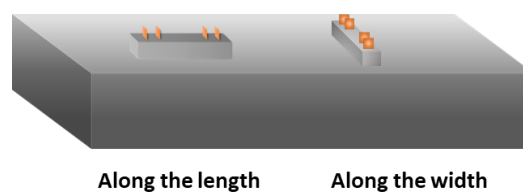
Figur 6. Experimentella uppställningar som används för laboratoriestudier.

4.3 Laboratorier tester - halvskala

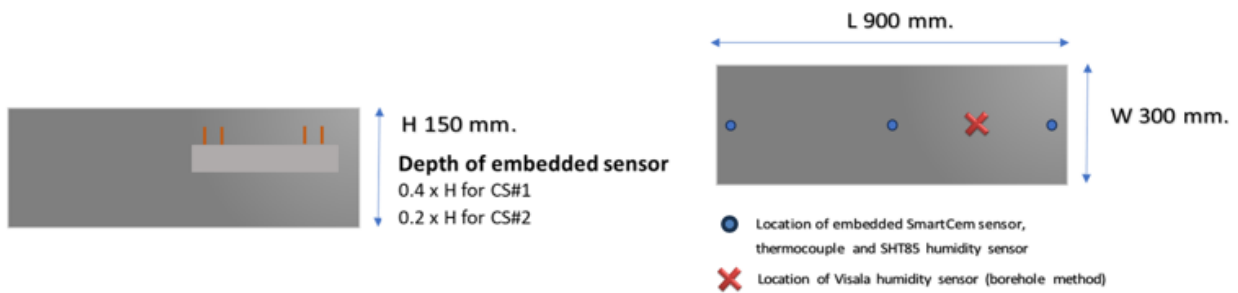
Två typer av betongplattor, var och en med måtten 300 x 900 x 150 mm (bredd x längd x höjd), göts för studien. Plattan CS#1 göts på ett metalldäck och plattan CS#2 gjuts med en plywoodskiva, Figur 7. SmartCem-sensorer var inbäddade i olika orienteringar för att identifiera den bästa riktningen för övervakningssystemet (Figur 8). Sensorinbäddningsdjupet följde borrhålsmetoden baserad på plattans torkningsförhållandens rekommendation av ASTM F2170 standard [4]: Sensorer placerades på 40 % djup från toppen för plattor som endast torkade uppifrån (t.ex. plattor på marken med en ångretarderare beläggning) eller på metalldäck), och vid 20 % djup för plattor som torkar uppifrån och ner, Figur 9. Testuppsättningen och placeringen av sensorerna för övervakning av temperatur och fuktighet i laboratorieplattorna illustreras i Figur 10.



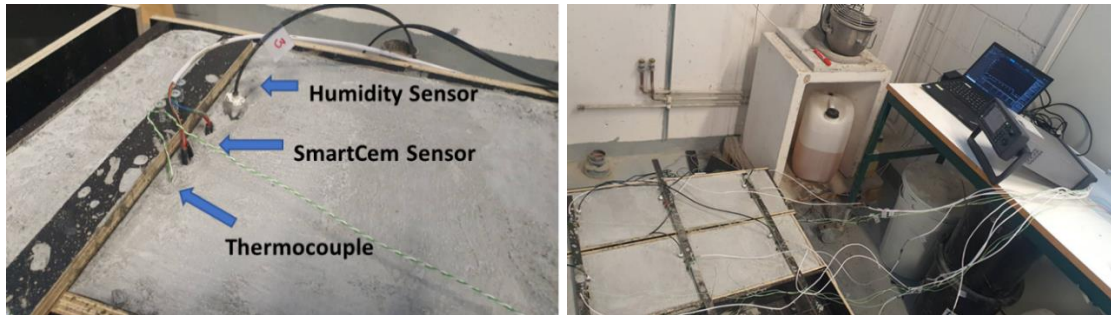
Figur 7. Betongplattor a) på metallskiva och b) på plywoodskiva.



Figur 8. Riktning för inbyggda SmartCem-sensorer.



Figur 9. Djup och placering av inbyggda sensorer.



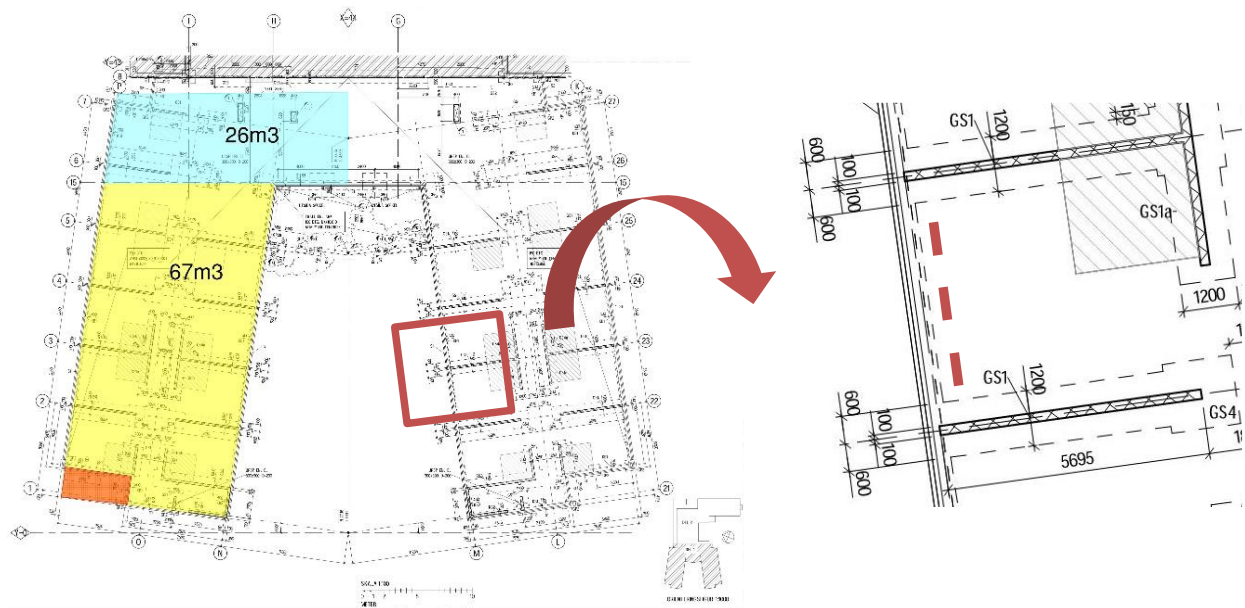
Figur 10. Testuppställningen för övervakning av temperatur och uttorkning under laboratorieförhållanden.

4.4 Fullskalig testning - Fältmätning

SmartCemHumid-systemet installerades på byggarbetsplatsen, beläget i Kalix, Figur 11. Systemet installerades på själva konstruktionen på byggplatsen i en platta. Placeringen av sensorerna visas i Figur 12. Sensorerna placerades på 40 % djup av plattan. Sensorer installerades på armeringsjärn på tre olika platser 60 cm från varandra som visas i Figur 13. Vid en senare ålder installerades Visala fuktsensorer nära de inbyggda sensorerna för att mäta fuktnivån i betongplattan efter en månad och tre månader, Figur 14.



Figur 11. Plats för byggarbetsplatsen där SmartCemHumid-systemet installerades i juli 2024. (Google Maps).



Figur 12 Placering av installerade sensorer för SmartCemHumid-systemet.



Figur 13. Installation av SmartCemHumid-systemet på en betongplatta på byggarbetsplatsen.



Figur 14. Visala fuktmätning med borrhålsmetoden

5 Resultat

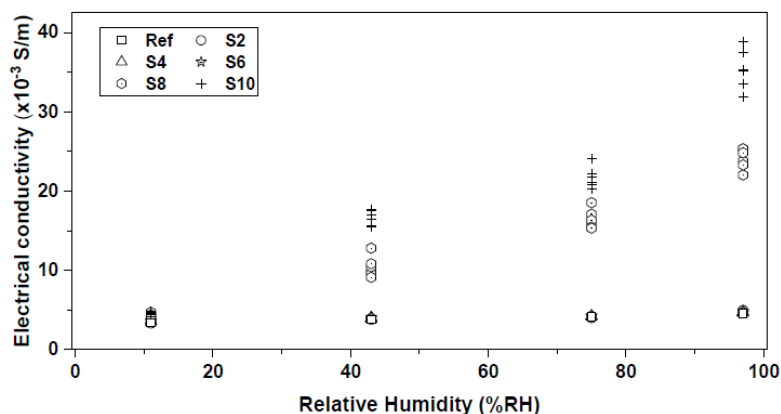
Det primära fokuset för detta projekt var fullskaligt testning, men innan dess gjordes ytterligare laboriemätningar för att samla in och verifiera data, som behövs för modelleringsändamål och senare tolkning av data som erhållits från den övervakade betongplattan på byggarbetsplatsen. Följande avsnitt sammanfattar alla laborietestresultat, modellering och första resultat som erhållits från byggarbetsplatsen. Övervakningen av testbetongplattan kommer att fortsätta under flera år.

5.1 Laborier tester – småskaliga prov

I denna studie undersöktes inverkan av omgivande relativ fuktighet (RH) och SmartCem-innehåll på den elektriska ledningsförmågan hos SmartCem-kompositensensorer. Resultaten visar hur RH- och SmartCem-innehåll resulterar i variationer i elektrisk ledningsförmåga, främst genom absorption eller desorption av vattenmolekyler. Dessa förändringar i omgivande luftfuktighet påverkar kompositens inre fuktighet, vilket leder till förskjutningar i rörelsen av fritt vatten inom strukturen och följaktligen förändra de elektriska egenskaperna hos SmartCem-sensorerna.

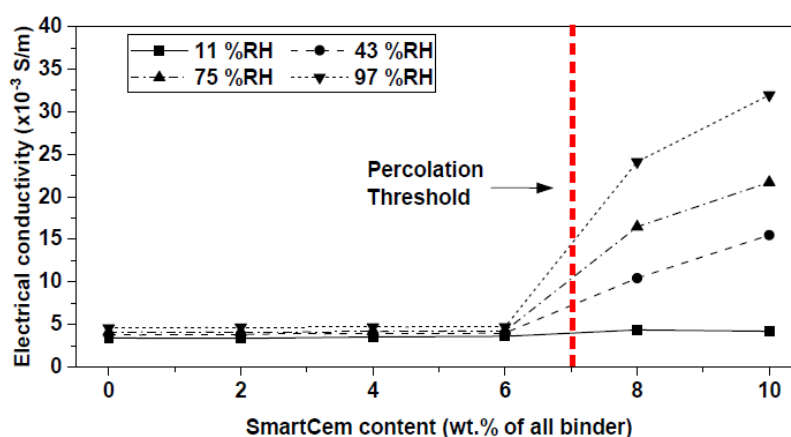
Figur 15 visar sambandet mellan elektrisk ledningsförmåga och relativ fuktighet för olika provformuleringar, inklusive referensprovet och SmartCem-varianterna (S2, S4, S6, S8, S10). Data indikerar en tydlig god korrelation mellan RH och elektrisk ledningsförmåga över alla SmartCem-sensorer. Med ökande relativ fuktighet ökar även konduktiviteten avsevärt.

Vid låg luftfuktighet (11% RH) visade alla SmartCem-sensorer liknande elektriska konduktivitetvärden, ungefär 4×10^{-3} S/m. Sensorer som innehåller mellan 2 vikt-% och 6 vikt-% SmartCem visar svar som liknar referensbruksproverna, vilket indikerar begränsad påverkan på konduktiviteten vid låga luftfuktighetsnivåer och lägre SmartCem-halt. Detta tyder på att fuktillgången är otillräcklig för att underlätta väsentlig jontransport i materialet.



Figur 15. Effekter av omgivande relativ fuktighet på den elektriska ledningsförmågan hos SmartCem-sensornerna.

Figur 16 visar korrelationen mellan den elektriska konduktiviteten och SmartCem-innehållet. Perkolationsströskeln observerades mellan 6-8 viktprocent av SmartCem-mängden. Det indikerar en kritisk övergång där materialets ledande nätverk blir helt etablerat. Över denna tröskel tillåter närvaron av CNF effektiv laddningsöverföring, särskilt under fuktiga förhållanden, vilket förbättrar den totala konduktiviteten hos SmartCem-sensornerna. SmartCem-sensorns perkolationszon som svar på fuktighetsvariationen identifieras mellan en nedre perkolationsströskel på 6 viktprocent och en övre perkolationsströskel på 8 viktprocent. SmartCem-sensorn (S8) valdes för semi- och fullskaliga tester.



Figur 16 Effekter av SmartCem-innehåll och omgivande relativ fuktighet på den genomsnittliga elektriska konduktiviteten [1–3].

5.2 Laboratorier tester – halvskala

Två typer av betongplattor (CS#1 och CS#2) gjöts och övervakades med hjälp av inbyggda SmartCem-sensorer för att undersöka sambandet mellan relativ fuktighet, värmeutveckling och elektrisk resistivitet över tid. Plattan CS#1, gjuten på en metallskiva, och platta CS#2, gjuten med en plywoodskiva, designades för att representera olika torknings- och fuktbevarande egenskaper. SmartCem-sensorer placerades på olika djup och riktningar baserat på ASTM F2170-rekommendationer för att bestämma den optimala placeringen för att övervaka temperatur- och fuktförändringar. Denna studie undersöker kort- och långsiktiga variationer i elektrisk resistivitet hos betongplattor. Plattor övervakades under 7 och 365 dagar.

5.2.1 Effekter av SmartCem-sensorns placering

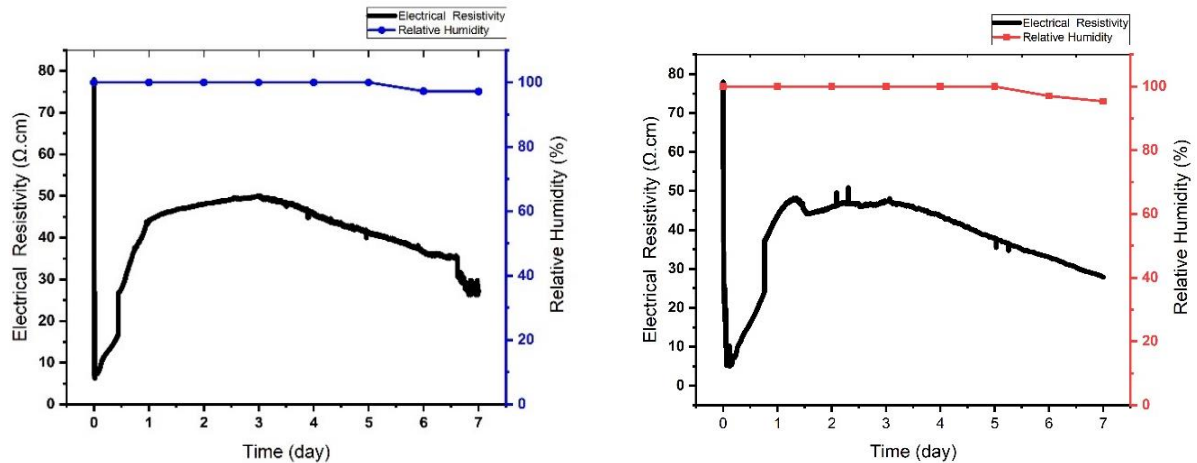
Resultaten visade att sensorernas orientering inte påverkade de erhållna avläsningarna, Tabell 1.

Tabell 1 Medelvärde och standardavvikelse för elektrisk resistivitet över orienteringar av SmartCem-sensorer i en platta gjuten på en metallskiva vid 28 dagar.

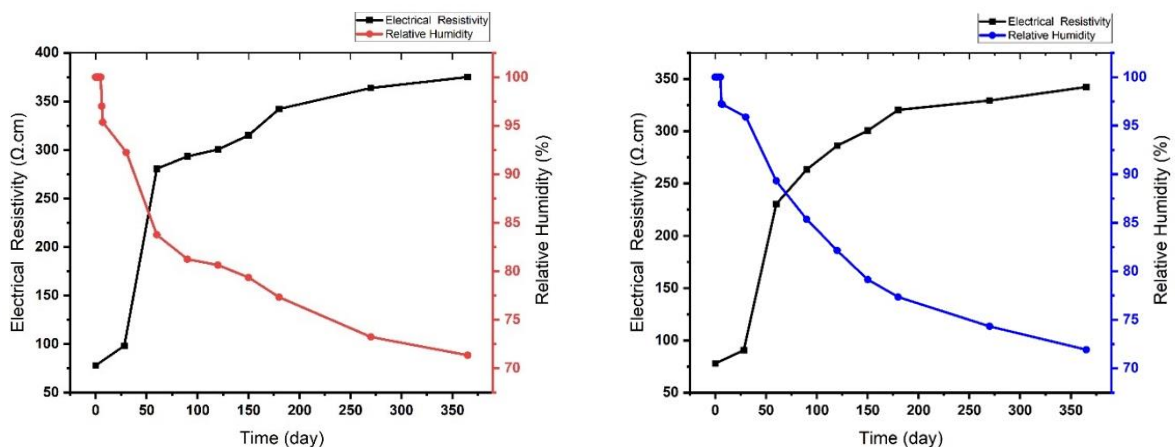
Sensororientering	Elektrisk resistivitet ($\Omega\cdot\text{cm}$) Medel \pm SD
Längs plattans längd	65 \pm 5
Tvårs plattans längd	66 \pm 4

5.2.2 Effekter av formmaterial

Det kortsiktiga beteendet för elektrisk resistivitet och relativ fuktighet övervakades under 7 dagar efter gjutning. I båda plattorna sjönk den elektriska resistiviteten snabbt under de första 24 timmarna, vilket indikerar början av hydrationsprocessen, där ledande banor inom cementmatrisen började bildas. Efter detta snabba fall började resistiviteten öka gradvis allt eftersom temperaturutvecklingen fortsatte (Figur 17). Formmaterialets inverkan föreföll endast ha en liten/försumbar effekt på variationerna i elektrisk resistivitet och uppmätt RH. Liknande trender observerades när de mättes under 365 dagar, Figur 18.



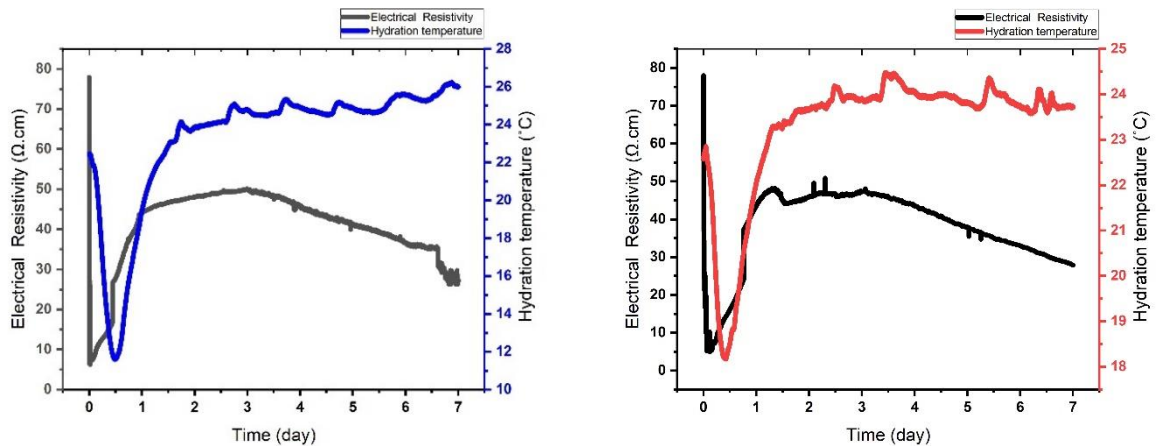
Figur 17 Korrelation mellan elektrisk resistivitet övervakad av SmartCem-sensorer och intern relativ fuktighet under 7 dagar för platta CS#1 (vänster) och platta CS#2 (höger)



Figur 18 Korrelation mellan elektrisk resistivitet övervakad av SmartCem-sensorer och intern relativ fuktighet under 365 dagar för platta CS#1 (vänster) och platta CS#2 (höger)

5.2.3 Elektrisk resistivitet vs. temperaturutveckling

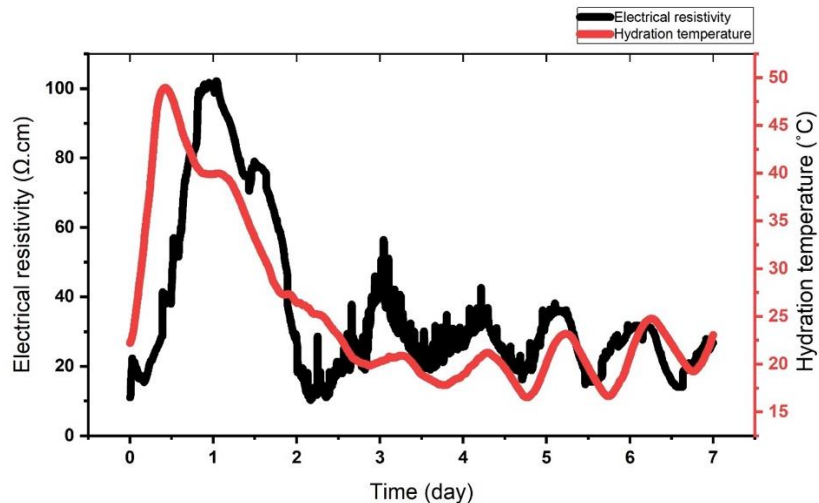
Temperaturutveckling övervakades tillsammans med resistiviteten för att bedöma inverkan av exoterma reaktioner på konduktiviteten, Figur 19. Båda plattorna uppvisade en initial ökning av temperaturen och nådde en topp inom den första dygnet på cirka 25°C, som förväntat under tidigt hydratationsskedet. Sammantaget visar resultaten att formmaterialet hade en liten effekt på den uppmätta temperaturutvecklingen. Denna studie belyser effektiviteten hos SmartCem-sensorer för att övervaka temperatur- och fuktbindningsdynamiken, vilket ger värdefulla insikter för att optimera betongens prestanda under olika förhållanden.



Figur 19 Korrelation mellan elektrisk resistivitet övervakad av SmartCem-sensorer och temperaturutveckling under 7 dagar för platta CS#1 (vänster) och platta CS#2 (höger)

5.3 Fullskalig testning - Fältmätning

Insamlingen av data från SmartCemHumid-systemet installerat i en betongkonstruktion i Kalix pågår fortfarande vid tidpunkten för denna rapport. Hittills har systemet effektivt spårat temperaturutvecklingen, som illustreras i Figur 20, vilket visar dess förmåga att övervaka temperaturförändringar i plattan. I framtiden kan denna övervakningsmetod ge värdefulla insikter för att optimera härdningsprocessen och bestämma lämplig tidpunkt för borttagning av formen. Figur 20 visar resultaten av övervakning av den elektriska resistiviteten och temperaturen för en betongplatta med SmartCem-sensorer under en 7-dagarsperiod. Grafen visar variationer i elektrisk resistivitet och temperaturförändring över tid, med distinkta trender i varje parameter som återspeglar förändringar i temperatur- och fuktförändring inom betongplattan.



Figur 20 Övervakning av temperatur på betongplattan vid fältmätning i byggprojekt (Kalix) med hjälp av referensmätning med termoelement (temperaturutveckling) och SmartCem-sensor (elektrisk resistivitet).

Under den första dygnet observerades en snabb ökning av både elektrisk resistivitet och temperatur. Temperaturutvecklingen når sin högsta temperatur (cirka 45°C) under de första timmarna, vilket indikerar den exoterma karaktären hos tidiga hydreringsreaktioner. Denna initiala temperaturtopp motsvarar en brant ökning av elektrisk resistivitet, som når nära 100 Ω.cm.

Den simultana ökningen av temperatur och resistivitet återspeglar den aktiva hydrationsprocessen när kemiska reaktioner genererar värme och bildar ledande joner-kanaler. Detta beteende är typiskt i betong eftersom hydratationen i det tidiga skedet främjar ledningsförmåga genom bildning av joner, även om resistiviteten förblir relativt hög på grund av ofullständig hydrering.

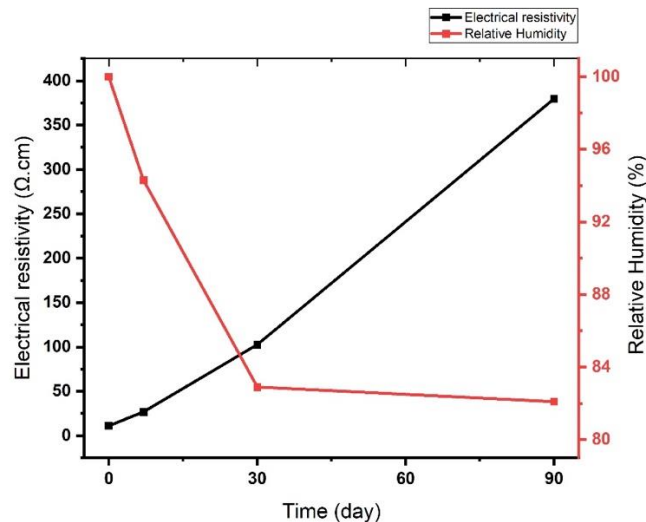
Mellan det första och tredje dygnet börjar temperaturen minska succesivt från sitt maximum och stabiliseras runt 25°C. Denna temperaturminskning motsvarar en märkbar nedgång i elektrisk resistivitet, som sjunker kraftigt från dess toppvärde och når nivåer under 40 Ω.cm i slutet av den andra dagen. Denna period av sjunkande resistivitet tyder på att när hydrationsprocessen fortskrider och temperaturen stabiliseras, fortsätter betongen att få anslutningsmöjligheter i sin inre struktur, vilket förbättrar jontransporten. Fallet i resistivitet under denna fas indikerar förbättrad ledningsförmåga när porsystemet i betongen blir mer sammankopplat. Detta beror sannolikt på den ökande närvaron av fria joner som genereras av de fortsatta kemiska reaktionerna. Stabiliseringen av temperaturen runt 25°C innebär en balans mellan värmegenerering och värmeförlust, vilket överensstämmer med en långsammare, ihållande hydrationsprocess efter den initiala toppen.

Från dag tre och framåt uppvisar både elektrisk resistivitet och temperatur cykliska fluktuationer. Temperaturen stabiliseras med mindre variationer runt 20-25°C, medan resistiviteten oscillerar och når minimivärden nära 20 Ω.cm, men visar upprepade toppar.

Dessa fluktuationer kan tillskrivas omgivningsfaktorer eller varierande fuktnivåer i plattan när den genomgår torknings- och temperaturfluktuationer. De lägre resistivitetsvärdena som observerats i denna fas indikerar att tillräckligt med fukt och joner finns närvarande för att bibehålla en viss nivå av konduktivitet, även om de upprepade ökningarna tyder på periodiska minskningar av fukthalten på grund av torkning. Det cykliska mönstret i resistivitet kan bero på

dagliga temperaturvariationer eller lokala torknings- och återfuktningseffekter inom plattan, där fukten omfördelas ojämnt.

SmartCem-sensorn visade sin effektivitet i att övervaka den elektriska resistiviteten och den relativa fuktigheten i betongplattan under en 90-dagarsperiod. Resultaten, som presenteras i Figur 21, indikerar en tydlig trend i både luftfuktighet och elektrisk resistivitet, vilket ger insikter om hydratationsprocessen och fuktdynamiken inom plattan.



Figur 21 Korrelation mellan elektrisk resistivitet hos plattan på Kalix-platsen övervakad av SmartCem-sensorer och intern relativ fuktighet under en 90-dygn

Inledningsvis, vid dag 0, registrerades den relativa fuktigheten inuti plattan till vattenmättad (ca 100 %), med en elektrisk resistivitet på 11,086 Ω·cm. Denna höga relativa fuktighet förväntas omedelbart efter gjutning, eftersom betongen är mättad med vatten som krävs för hydratation. Vartefter hydratationsprocessen fortskred minskade fuktigheten stadigt och nådde 94,3 % på dag 7, med en motsvarande ökning av resistiviteten till 26,832 Ω·cm. Denna ökning av resistivitet indikerar den pågående minskningen av porvattenhalten när hydratationen fortsätter.

Vid dag 28 hade fuktigheten minskat till 82,9 %, med en signifikant ökning av resistiviteten till 102,546 Ω·cm. Denna trend speglar betongens fortsatta hårdnande och uttorkning, med motsvarande minskning av fukt som bidrar till ökad resistivitet. På dag 90 stabiliserades fuktnivån på cirka 82,1 %, medan den elektriska resistiviteten nådde en topp på 479,75 Ω·cm. Denna avsevärda ökning av resistivitet tyder på en minskning rörlighet av joner inom porstrukturen på grund av minskade fuktnivå, vilket tyder på betongens ökade mognad.

Efter 90 dagar låg det snö som täckte testbetongplattan, vilket kan ha bidragit till de förhöjda fuktnivåerna i betongen. Den yttre fukten från snön kan ha begränsat torkningsprocessen, vilket ledde till en långsammare sänkning av den inre fuktigheten än förväntat i detta skede. Denna omgivningspåverkan kan förklara den relativt höga fuktigheten på 82,1 % efter 90 dagar, trots den långt gångna av hårdningsprocessen. Följaktligen bör de elektriska resistivitetsvärdena tolkas med viss försiktighet, eftersom yttre förhållanden kan ha påverkat fuktnivån i plattan.

Användningen av Visala-borrhålsmetoden med SmartCemHumid-systemet gav en värdefull jämförelse och validering av fuktmätningar, vilket stödde de observerade trenderna. Data visar att SmartCemHumid-sensorn kan fånga viktiga fuktrelaterade förändringar i plattan över tid, en

kritisk faktor för att bedöma hållbarhet och potentiella försämringsmekanismer. Dessutom kan detta övervakningssystem potentiellt informera framtida beslutsfattande angående härdningsprocessen och optimal tidpunkt för formrivning.

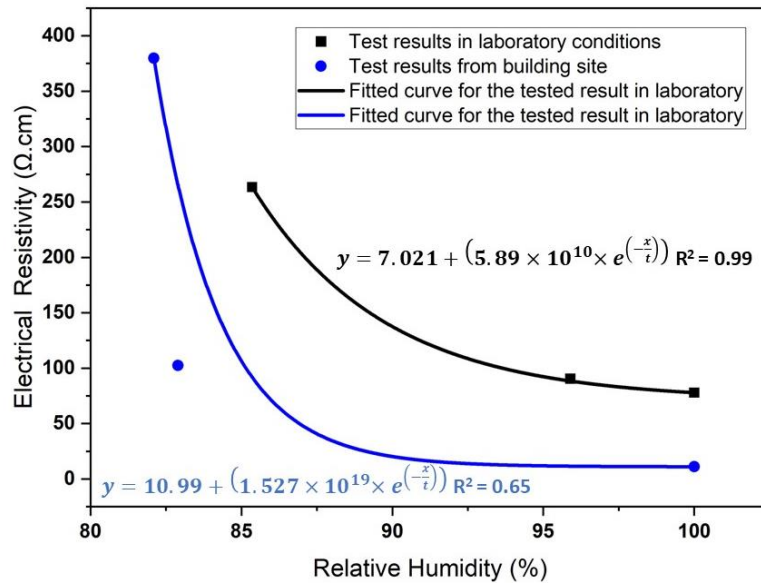
Sammantaget bekräftar resultaten att elektriska resistivetsmätningar är en tillförlitlig indikator på plattans temperatur- och uttorkningsförlopp. Den stadiga ökningen av resistivitet motsvarar betongens naturliga härdningsförlopp, vilket indikerar SmartCemHumid-systemets potential för långsiktig övervakning av strukturell status. Detta tillvägagångssätt kan vara värdefullt för pågående bedömningar av beständighet samt tidig upptäckt av nedbrytningar, vilket i slutändan stöder bättre underhåll och livscykelhantering av betongkonstruktioner.

5.4 Modellering

SmartCemHumid-systemet utnyttjar sofistikerade modelleringstekniker för att tolka de elektriska egenskaperna hos SmartCem-sensorer när de reagerar på förändringar i relativ fuktighet (RH) och andra omgivningsfaktorer. Denna modelleringskomponent är väsentlig för att förstå systemets fuktberoende beteende och för att översätta sensoravläsningar till meningsfulla insikter om den interna fuktdynamiken i betongkonstruktioner.

Elektrisk resistivitet i SmartCem-sensorn påverkas starkt av luftfuktighetsnivåer eftersom fukthalten påverkar jonrörligheten i materialmatrisen. När RH ökar absorberar materialet vattenmolekyler, vilket förbättrar anslutningsmöjligheten för ledande vägar, vilket ökar den elektriska ledningsförmågan. Omvänt, när fuktigheten minskar, torkar materialet ut, vilket minskar jonrörligheten och ökar den elektriska resistiviteten. Detta förhållande mellan elektrisk resistivitet och RH är icke-linjärt, och det kan representeras av en anpassad kurva som modellerar förändringarna i resistivitet som en funktion av fuktighet.

För att verifiera tillförlitligheten av denna modell jämfördes laboratorietestresultat med långtidsmätningar från ett fullskaletest utfört under tre månader. Figur 22 illustrerar denna jämförelse och visar den anpassade ekvationen som utvecklats från laboratorietester tillsammans med resistivetsmätningar erhållna under verkliga förhållanden. Det blir uppenbart att medan både laboratoriemätningar och fältmätningar uppvisar en liknande trend, skiljer sig koefficienterna i de anpassade ekvationerna mellan de två förhållandena. Denna skillnad indikerar att modellen som utvecklats från laboratoriedata kanske inte förutsäger exakta resistivetsvärden under alla förhållanden, även om den effektivt fångar den allmänna trenden av resistivetsförändringar med varierande fuktighet.



Figur 22 Jämförelse av elektrisk resistivitet vs. relativ fuktighet hos betongplatta för laboratorie- och förhållanden på plats.

Avvikelsen mellan laboratorie- och fältförhållanden belyser en begränsning av modellen: medan den exakt fångar trenden av resistivitetsbeteende som en funktion av RH, kan den inte alltid förutsäga exakta resistivitetsvärden i olika miljöer. Faktorer som betongens ålder, omgivande väderförhållanden och specifika exponeringsmiljöer kan påverka de elektriska egenskaperna hos SmartCem-materialet, vilket skapar variation som den laboriebaserade modellen inte fullt ut tar hänsyn till.

Sammanfattningsvis, medan modellen som utvecklats från laborietester ger värdefull insikt i resistivitetstrender med ändrad fuktighet, har den inneboende begränsningar när den appliceras direkt på fältförhållanden. Denna anpassade kurva ger ett användbart ramverk för att förstå riktningen och karaktären av resistivitetsförändringar som svar på RH-variationer, men den tar inte hänsyn till alla verkliga variabler som påverkar resistivitetsbeteendet i betong. Genom att fokusera på generella trender snarare än absoluta värden kan SmartCemHumid-systemet fortfarande ge effektiv långsiktig övervakning av fuktdynamik i betongkonstruktioner, med insikten att exakta resistivitetsvärden kan variera beroende på ålder, miljö och exponeringsförhållanden. Detta trendbaserade tillvägagångssätt möjliggör tillförlitlig övervakning samtidigt som man känner igen och tar hänsyn till variationen hos dessa komplexa miljöfaktorer.

5.5 Ekonomiska aspekter

För närvarande har syntesen av SmartCem endast utförts i liten skala med hjälp av en laboriekemisk ångdepositionsreaktor (CVD). På grund av denna begränsning är en exakt uppskattning av produktionskostnaderna inte möjlig i detta skede. Potentialen att använda metan som en relativt billig kolbärande gas tyder dock på att den slutliga kostnaden för att producera SmartCem kan hållas låg. Övriga komponenter för övervakningssystemet finns kommersiellt tillgängliga som hyllvaror, vilket bidrar till en potentiellt gynnsam kostnadsbild för systemet.

Nästa utvecklingssteg för SmartCem innebär en uppskalning av syntesprocessen. Denna utveckling kommer att kräva samarbete med industriella partners som har erfarenhet av att skala upp tillverkningsprocesser. Uppskalning skulle möjliggöra produktion av större kvantiteter av

SmartCem, vilket skulle ha en positiv kostnadspåverkan och en ökad tillgänglighet för bredare tillämpningar.

6 Resultatspridning

En del av resultaten från detta projekt publicerades i vetenskapliga tidskrifter och en doktorsavhandling, som försvarades i oktober 2023. Detaljer och länkar till publikationerna listas nedan.

- "Novel humidity sensors based on nanomodified Portland cement" Buasiri, T., Habermehl-Cwirzen, K., Krzeminski, L., & Cwirzen, A. Nature Scientific Reports, 1–10, 2021.
- "Sensing mechanisms of nanomodified Portland cement composites" Buasiri, T., Habermehl-Cwirzen, K., Krzeminski, L., & Cwirzen, A. Cement and Concrete Composites, Volym 151, augusti 2024, 105602
- Buasiri, T., 2023, "Sensing capability of nanomodified Portland cement composites", Luleå tekniska universitet, doktorsavhandling.

De vetenskapliga artiklarna som beskriver resultaten av fullskaliga tester på plats befinner sig för närvarande i förberedelsefasen. Förväntan på att färdigställa manuskripten och lämna in dem till en vetenskaplig tidskrift i början av 2025. Dessa artiklar kommer att ge en omfattande analys av testresultaten, inklusive systemprestanda, data som samlats in under installationerna och den övergripande effektiviteten av de metoder som används.

7 Slutsatser

- Den partiella ersättningen av Portlandcement med nanomodifierad SmartCem, med in-situ syntetiserade kolnanofibrer, möjliggjorde framgångsrikt produktionen av självvåkännande murbrukssensorer. Dessa sensorer kan spåra viktiga parametrar med särskild tonvikt på att övervaka inre fuktdynamik i betongkonstruktioner.
- SmartCem-sensorerna har visat en hög nivå av känslighet för fuktvariationer vid en senare ålder, en kritisk faktor för att förstå fuktrörelser i betongen. Denna förmåga är särskilt viktig eftersom inre fuktighetsnivåer direkt påverkar härdningsprocessen, långvarigt torkningsbeteende och potentiella nedbrytningsmekanismer. Genom att tillhandahålla fukt-data i realtid stöder systemet tidig identifiering av fuktrelaterade problem som kan äventyra konstruktionens beständighet, inklusive krympning, sprickbildning och korrosion av ingjuten armering.
- Sammansättningen av murbruk som används för att producera sensorer, d.v.s. W/C-förhållande, typ av cement, ytterligare SCM, kemiska tillsatser och fin sand, kan vara densamma som i betongen som ska övervakas, vilket kommer att leda till samma åldring processer (förlänger) av sensorer och övervakad betong.
- Fälttester i Kalix, Sverige, har validerat effektiviteten av SmartCemHumid-systemet i verkliga förhållanden. Initiala resultat från både laborietester och fullskaliga tester indikerar en stark korrelation mellan laboriedata och mätningar på plats, vilket bekräftar systemets förmåga att övervaka temperatur- och fukttrender. Den pågående övervakningen på Kalix förväntas ge värdefulla insikter under flera år, i syfte att bedöma långsiktiga nedbrytningsmekanismer och potentialen för proaktiva underhållsstrategier.

- SmartCemHumid-systemets fuktavkännande egenskaper, tillsammans med dess multifunktionalitet, har positiv inverkan för fuktsäkerhet i byggandet och förvaltning av byggnader.

8 Referenser

- Andrade, C., J. Sarría, and C. Alonso. 1999. "Relative Humidity in the Interior of Concrete Exposed to Natural and Artificial Weathering." *Cement and Concrete Research*. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00123-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00123-4).
- Buasiri, Thanyarat. 2023. "Sensing Capability of Nanomodified Portland Cement Composites."
- Gause, G.R., and John Tucker. 1940. "Method for Determining the Moisture Condition in Hardened Concrete." *Journal of Research of the National Bureau of Standards*. <https://doi.org/10.6028/jres.025.019>.
- Grasley, ZC, and DA Lange. 2004. "A New System for Measuring the Internal Relative Humidity in Concrete." *University of Illinois at Urbana-Champaign*
- Jensen, Ole Mejlhede, and Per Freiesleben Hansen. 1999. "Influence of Temperature on Autogenous Deformation and Relative Humidity Change in Hardening Cement Paste." *Cement and Concrete Research*. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00021-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00021-6).
- Loukili, Ahmed, Abdelhafid Khelidj, and Pierre Richard. 1999. "Hydration Kinetics, Change of Relative Humidity, and Autogenous Shrinkage of Ultra-High-Strength Concrete." *Cement and Concrete Research*. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00022-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00022-8).
- Nilsson, L. O. 2002. "Long-Term Moisture Transport in High Performance Concrete." *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*. <https://doi.org/10.1617/13972>.
- Norris, Ashley, Mohamed Saafi, and Peter Romine. 2008. "Temperature and Moisture Monitoring in Concrete Structures Using Embedded Nanotechnology/Microelectromechanical Systems (MEMS) Sensors." *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.05.047>.