

PROJEKTNR. 14029

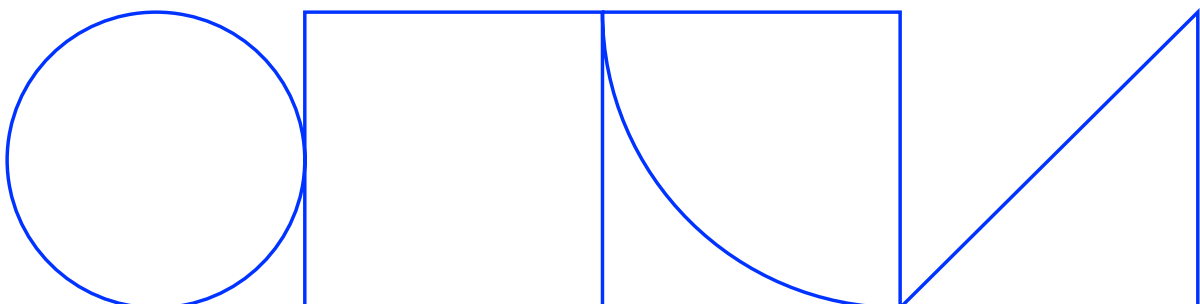
# SmartCem Monitoring – självövervakande betong

## Sammanfattning

---

Thanyarat Buasiri, Andrzej Cwirzen, Karin Habermehl-Cwirzen, Hans Hedlund  
LTU, Skanska

2023-11-09

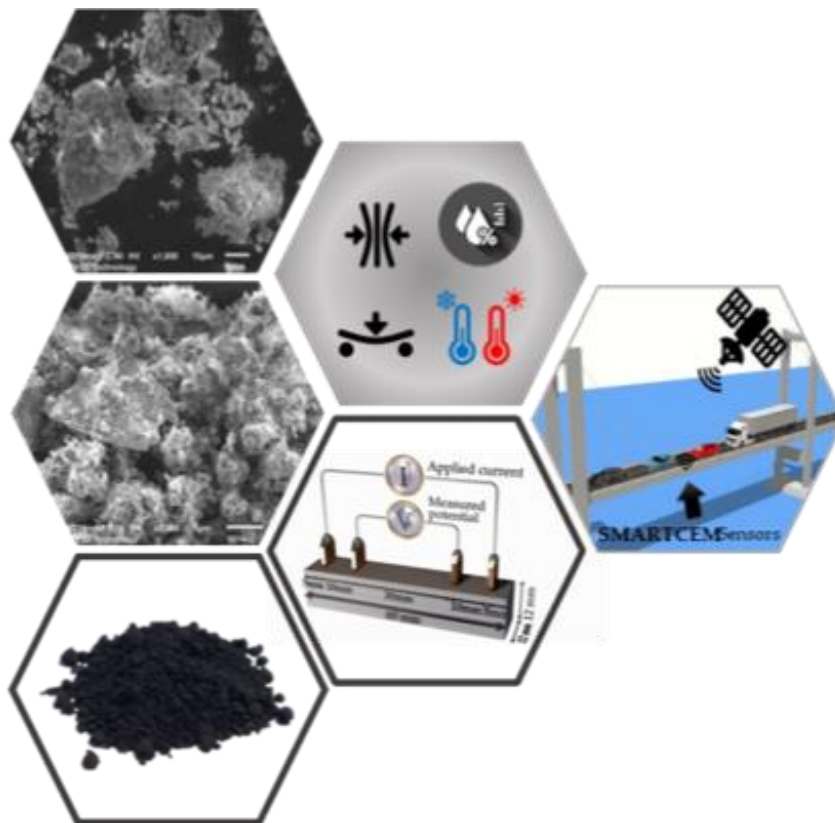


# SmartCem Monitoring – självövervakande betong

SmartCem Monitoring – self monitoring concrete

Thanyarat Buasiri, Andrzej Cwirzen, Karin Habermehl-Cwirzen, Hans Hedlund  
LTU, Skanska

2023-11-09



## Sammanfattning och slutsatser

*Genom ny teknik kan betongkonstruktioner övervakas från gjutning och framåt. Detta ger nya möjligheter för entreprenörerna att övervaka och bland annat följa betongens temperatur- och hållfasthetsutveckling och deformationer under produktionsskedet. Det ger även en möjlighet för anläggningsägaren att vidare fortsätta övervaka tillstånd och status för betongkonstruktionen under driftskedet.*

Syftet med detta projekt var att installera och testa det sensorbaserade övervakningssystemet SmartCem på en fullskalig betongbro. Innan dess fokuserade forskningen på att samla data för att bättre förstå responsmekanismer samt att härleda modeller som möjliggör analys och tolkning av de data som samlats in. I förberedelserna ingick även att designa datainsamlingsystem och installationstekniker för SmartCem-sensorer.

Resultaten visade att om Portlandcement delvis ersattes med den nanomodifierade SmartCem (Portlandcement med in situ-syntetiserade kolnanofibrer) blev det möjligt att producera murbruk med självavkännande egenskaper. SmartCem-sensorerna kan mäta förändringar av töjning, spänning, temperatur (>40 °C) och fuktighet samt detektera sprickbildning. Det fanns en god korrelation mellan de data som samlats in i laboratoriet och data från den fullskaliga bron när det gällde hydrering av Portlandcement. Det installerade systemet kommer att vara i drift under en längre period.

Projektet var ett samarbete mellan LTU och Skanska och finansierades av SBUF (Svenska byggbranschens utvecklingsfond), Trafikverket och LTU.

## Summary and conclusions

*Through new technology, concrete structures can be monitored from casting onwards. This provides new opportunities for the contractors to monitor and, among other things, follow the concrete's temperature and strength development and deformations during the production stage. It also provides an opportunity for the owner of the infrastructure to further monitor the condition and status of the concrete structure during the operational phase.*

The goal of this research project was to install and test SmartCem sensor-based monitoring systems on full-scale concrete bridges. Prior to that, research focused on collecting more data needed to design installation technologies and data acquisition systems. These data were also used to understand the measurement mechanism, which was needed to formulate models that enable interpretation of the collected data.

The results showed that a partial replacement of Portland cement with nanomodified SmartCem (Portland cement with in-situ synthesized carbon nanofibers) enabled the production of mortar with self-sensing properties. Sensors can measure changes in strain, stress, temperature (>40°C), humidity and detect cracking. There was a good correlation between the data collected in the laboratory and on the full-scale bridge regarding the hydration of Portland cement. The installed system will be in operation for an extended period.

The project was a collaboration between LTU and Skanska and was financed by SBUF, the Swedish Transport Administration and LTU

# Innehåll

<u>SAMMANFATTNING OCH SLUTSATSER .....</u>	<u>1</u>
<u>SUMMARY AND CONCLUSIONS.....</u>	<u>1</u>
<u>INNEHÅLL .....</u>	<u>2</u>
<u>BAKGRUND.....</u>	<u>3</u>
<u>AVSIKT .....</u>	<u>3</u>
<u>METODER .....</u>	<u>3</u>
<u>TESTRESULTAT .....</u>	<u>6</u>
<u>FORTSATT FORSKNINGSBEHOV.....</u>	<u>9</u>
<u>SLUTSATSER.....</u>	<u>9</u>

## Bakgrund

De flesta anläggningskonstruktioner tillverkas fortfarande till övervägande del av betong, ett material som varit känt och använt i årtionden. Trots all erfarenhet och kunskap finns det fortfarande obesvarade frågor, särskilt när det gäller långsiktig hållbarhet hos strukturer som utsätts för hårda miljöförhållanden. Att kunskap saknas blir tydligare, och dessutom farligare, i takt med den ökade användningen av nya ekologiska betongtyper, som innehåller biprodukter från industrin. Därför är ett tillförlitligt övervakningssystem extremt viktigt för att säkerställa lång livslängd hos konstruktionerna, liksom för att öka säkerheten och sänka underhållskostnaderna. Dagens vanligaste övervakningssystem är baserade på lösningar som utvecklats för andra applikationer och material. Ofta bygger de på att metallsensorer sätts fast på betongytan med lim eller med mekaniska kontakter. Sådana system utsätts lätt för mekaniska skador, och risken är stor att sensorerna lossnar från betongytan, vilket resulterar i att systemen har låg tillförlitlighet och kort livslängd.

I det slutförda doktorandprojekt som redovisas i denna rapport studerades ett övervakningssystem baserat på murbrukssensorer med nanomodifierad Portlandcement som bäddats in i de övervakade elementen. Forskningsprogrammet omfattade laborietester, modellering och fullskalig tillämpning på betongbroar i norra Sverige. Testerna genomfördes vid Luleå tekniska universitet i samarbete med Skanska AB. Flera andra industripartner var involverade i projektet genom referensgruppen: NCC, RISE och Cementsa. Projektet finansierades av SBUF och Trafikverket.

## Avsikt

Den första delen av den avslutade doktorandstudien omfattade produktion och studier av elektriska egenskaper hos murbrukssensorer innehållande 6–10% av den nano modifierade Portlandcementen (SmartCem). Murbruk efter stelning hade stark piezoresistiv egenskap som var potentiellt lämplig för övervakningsändamål. Små sensorer kunde mäta spänningar, stress, temperatur, relativ fuktighet och sprickbildning.

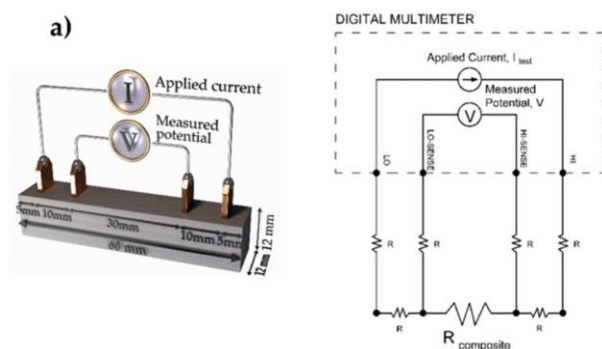
Det primära syftet med denna del av forskningen var att samla in mer data, utföra fullskalig installation och testning av SmartCem-baserade sensorer. Studien omfattade design av installationstekniker, datainsamlingssystem, analys av data och formulering av teoretiska modeller. Den ursprungliga planen inkluderade också installation av systemet på befintliga strukturer. Tekniska begränsningar, begränsad tillgång till strukturer och tidsbegränsningar förhindrade emellertid att denna del av projektet genomfördes fullt ut. Det är planerat att göra en sådan installation i uppföljningsprojektet.

## Metoder

Doktorandprojektet har bestått av fem delar. Det första steget bestod av teoretiskt arbete om installationsmetoder för det studerade övervakningssystemet. Arbetet omfattade både nya och gamla betongkonstruktioner (WP1). I nästa steg designades och testades övervakningssystemet i laboriemiljö. Detta inkluderade datainsamling och konstruerat av strömförsörjningssystem (WP2). Kärnan i det tredje steget av projektet var att installera och testa övervakningssystemet på en ny betongbro i närheten av Pajala i norra Sverige (WP3). I det fjärde steget analyserades alla insamlade data, inklusive data från

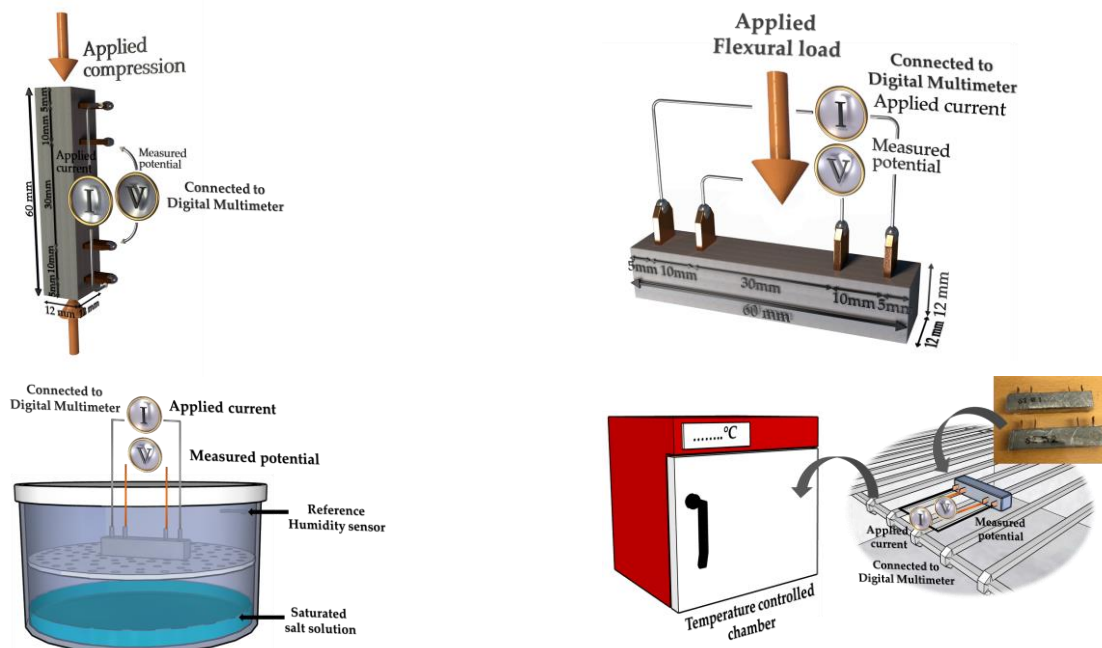
den första delen av doktorandprojektet, och mätmekanismer modellerades (WP4). Ekonomiska aspekter och en möjlig affärsplan behandlades kortfattat i det femte steget (WP5).

De SmartCem-sensorer som användes tillverkades av murbruk blandat under vakuum. Vatten-till-bindemedelsförhållandet ( $w/b$ ) var 0,35, medan sand-bindemedelsförhållandet ( $s/b$ ) var 1. Materialet innehöll 0,8 viktprocent polykarboxylatbaserad superplasticizer. SmartCem-halten varierade: 0 viktprocent (Ref), 2 viktprocent (S2), 4 viktprocent (S4), 6 viktprocent (S6), 8 viktprocent (S8) och 10 viktprocent (S10) baserat på bindemedlets totala vikt. Alla sensorer hade dimensioner på 60 x 12 x 12 mm och var anslutna till systemet med 4-sondmetoden, se Figur 1.



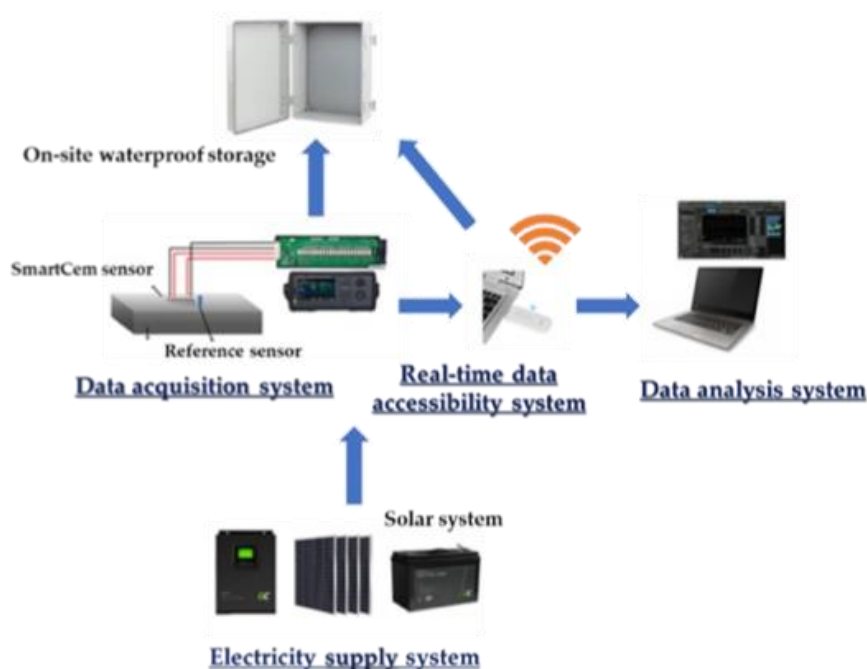
Figur 1. Sensorstorlek och anslutningsdiagram till övervakningssystemet.

I laboratoriestudien mättes effekterna av tryck, spänning, temperatur och fuktighet på den elektriska resistiviteten. Dessa data kombinerades med data från den första delen av doktorandprojektet och användes för modellering. Den tillämpade experimentella uppsättningen visas i Figur 2 och i referenser.



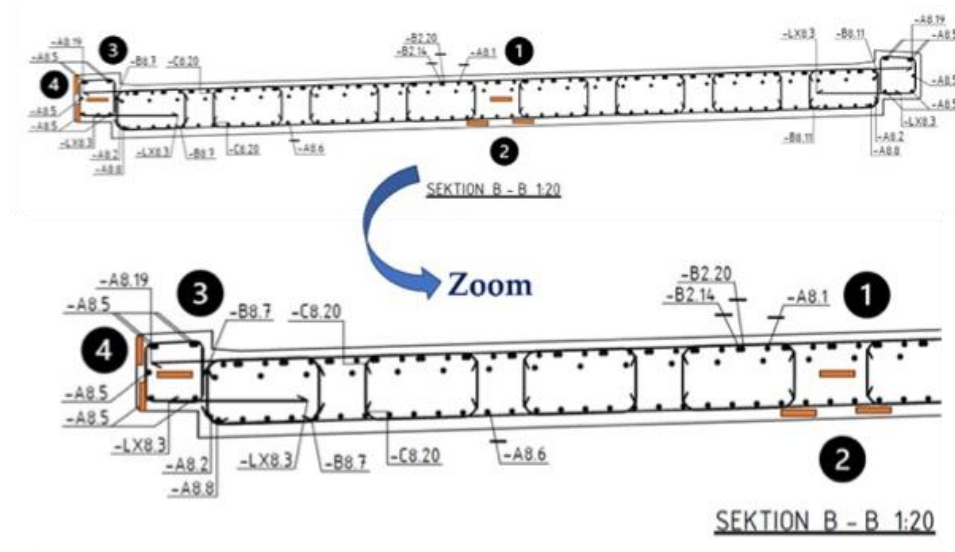
Figur 2. Experimentella uppställningar.

Det kompletta övervakningssystemet som installerades på bron bestod av fyra huvuddelar, se figur 3: datainsamlingsystemet, realtidstillgänglighetssystemet, strömförsörjningssystemet, dataanalyssystemet.



Figur 3. SmartCem övervakningssystem installerat på bron i norra Sverige.

Placeringen av sensorerna visas i Figur 4. Sensorerna placerades i mitten av plattan, där de högsta temperaturerna förväntades under cementshydrering (1), på botten/mittspannet av plattan där det var högst sannolikhet för sprickbildning (2), på kanten av plattan där frostsador och kloridinträngning förväntades vara störst (3)(4). Sensorer installerades också på armeringsjärn, vilket visas i Figur 5



Figur 4. Platser för SmartCem-sensorer.



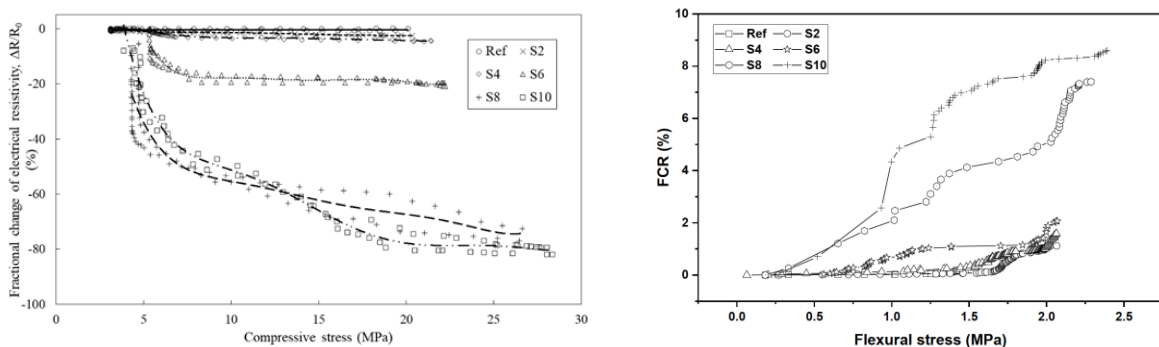
Figur 5. Installation av sensorer på bro nära Pajala i norra Sverige

## Testresultat

Det primära fokuset för denna del av doktorandprojektet var fullskaletestning av systemet. Innan dess gjordes ytterligare laboriemätningar för att samla in och verifiera data. Dessa data användes dels för modellering, dels för tolkning av de data som senare samlades in från den övervakade bron. Följande avsnitt sammanfattar alla laborietestresultat, modelleringen och de första resultaten från bron. Övervakningen av testbron kommer att fortsätta i flera år.

- Småskaliga laborietester

Exempel på resultat från laborietesterna visas i Figur 6 och i Figur 7. Vid både kompression och böjning observerades den piezoresistiva effekten, det vill säga en stark förändring av den elektriska resistiviteten på grund av spänningar. I båda fallen observerades en perkolationsströskel vid 8 viktprocent av tillsatt SmartCem. Perkolationsströskeln kan definieras som den minsta mängden ledande material som resulterar i en signifikant ökning av det piezoelektriska svaret.

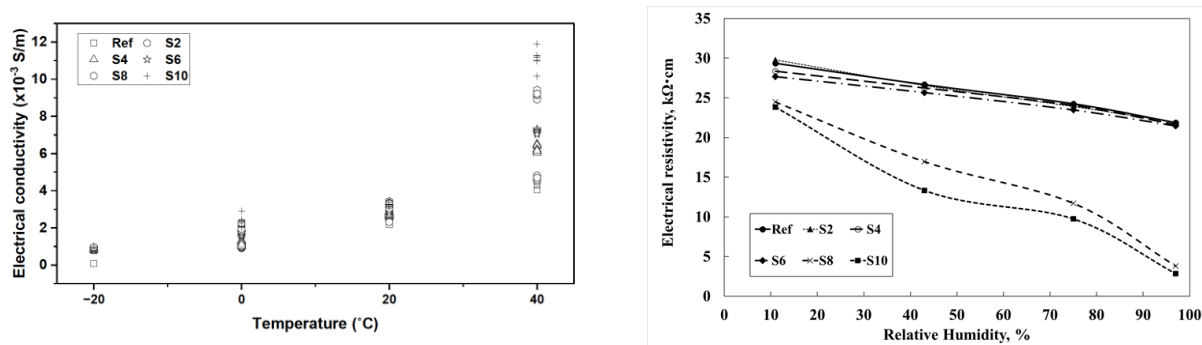


Figur 6. Piezoresistiv respons från SmartCem-sensorer på tryck- och böjspänningar. S betecknar mängden SmartCem i viktprocent av den totala bindemedelmängden.

SmartCem-sensorernas respons på temperatur- och luftfuktighetsvariationer var svagare jämfört med när interna spänningar inducerades. Den elektriska ledningsförmågan förändrades knappt när temperaturen ökades från  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  till  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Responsen var däremot mycket stark när temperaturen höjdes till  $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , se Figur 7 (vänster diagram).

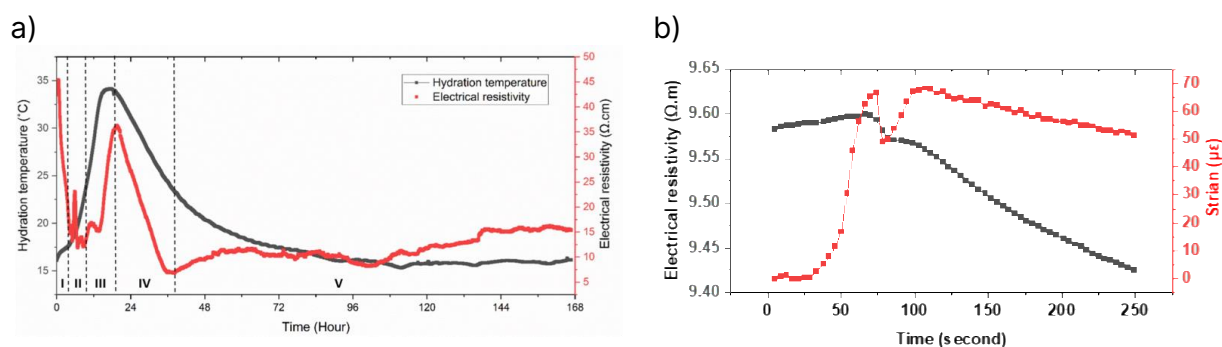


Förändringar av den elektriska resistansen observerades för alla testade prover, inklusive för den referens som inte innehöll någon SmartCem. Responsen blev dock tillräckligt stark för att användas vid övervakning när mängden tillsatt SmartCem var 8 och 10 viktprocent, se Figur 7 (höger diagram).



Figur 7. Förändring av SmartCem-sensors elektriska resistivitet till variation i temperatur och fuktighet, S betecknar mängden SmartCem i viktprocent av den totala bindemedelsmängden.

Inledande tester för att undersöka om SmartCem-sensorer är lämpliga för att övervaka hydratiseringsprocessen gjordes på halvfull skala 4 meter lång armerad betongbalk. Resultaten visade en väldefinierad topp som väl motsvarade den maximala uppmätta temperaturen, se Figur 8a. Samma balk testades senare i 3-punktsböjning tills fel. Förändringar av den elektriska resistiviteten motsvarade väl den uppmätta belastningen, se Figur 8b.

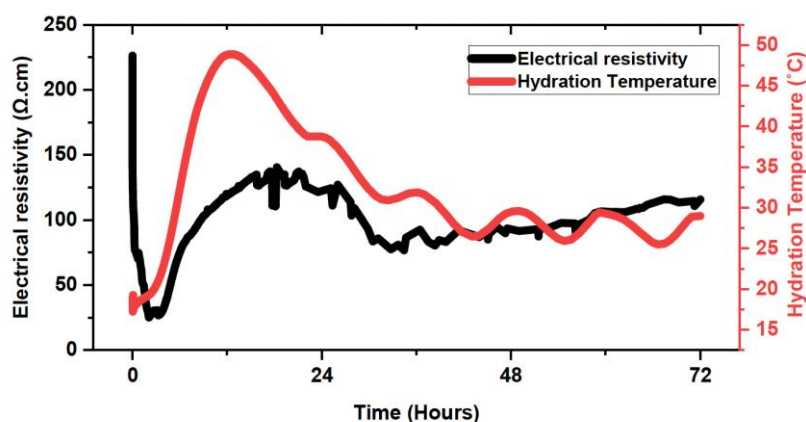


Figur 8. a) Övervakning av hydratiseringsprocesser på halvstorskalig förstärkt stråle. ("Hydreringstemperatur" mättes med termoelement och "Elektrisk resistivitet" mättes med SmartCem-sensor), b) Töjning mätt med "vanliga töjningsmätare jämfört med förändringar av elektrisk resistivitet mätt med SmartCem-sensorer.

- **Tester på fullskalig betongbro**

Testerna på bron pågår fortfarande när denna slutrapport skrivs. Mätningarna planeras fortsätta under många år för att se om eventuella försämringsmekanismer kan detekteras

av det smarta systemet. Systemet gjorde det möjligt att följa hydratiseringsprocessen, se Figur 9.



Figur 9. Övervakning av hydrering på Pajalabron (sensor 1 från Figur 4) med hjälp av referenstermoelement (hydratiseringstemperatur) och SmartCem-sensor (elektrisk resistivitet).

- **Modellering**

Detaljer om hur följande modeller utvecklades och verifierades finns i de angivna referenserna.

Den fraktionerade förändringen i den elektriska resistiviteten hos SmartCem-kompositerna ( $FCR$ ) på grund av den applicerade spänningen ( $\sigma$ ) var relaterad till den piezoresistiva effekten och kan beräknas som:

$$FCR(\%) = (A\sigma + B\sigma^2)$$

Där A, B är koefficienter som beror på mängden SmartCem som används för att producera sensorer och visas i **Fel! Ogiltig självreferens i bokmärke..**

De elektriska egenskaperna hos SmartCem-kompositerna påverkas av fluktuationer i relativ luftfuktighet (RH). Absorption av vattenmolekyler påverkar den elektriska anslutningen av de ledande faserna på grund av kapillärkondensationen. Den elektriska ledningsförmågan hos SmartCem-kompositen som beskriver det fuktberoende beteendet kan uttryckas med:

$$\sigma_{e,h} = C + \frac{D}{[\ln(\%RH/100)]}$$

där C och D är koefficienter som beror på den mängd SmartCem som används för att producera sensorer, tabell 1.

Förändringar av den elektriska resistiviteten på grund av temperaturvariationer var relaterade till kontraktion/expansion och kan modelleras med hjälp av:

$$\sigma_{e,t} = E \exp\left(-\frac{F}{T_C + 273.15}\right)$$

där E och F är koefficienter som beror på mängden SmartCem som används för att producera sensorer, **Fel! Ogiltig självreferens i bokmärke..**

Tabell 1. Koefficienter för modeller relaterade till FCR, förändringar av RH och temperatur.

Mix	SmartCem Vikt-% bindemedel	A	B	C	D	E	F
S2	2	0.20290	0.00202	3.70585	0.03029	43.536	2865.747
S4	4	0.25448	0.00129	3.83140	0.02675	445.447	3500.952
S6	6	2.03052	0.05924	3.89876	0.02582	304.125	3340.836
S8	8	5.03367	0.08409	9.46367	0.46153	1678.733	3800.974
S10	10	5.30494	0.08396	12.87000	0.70635	16732.194	4460.158

## Fortsatt forskningsbehov

Kemiska aktivering (Chemical Vapor Deposition teknik) av SmartCem är en fortsatt utmaning där andra aktiveringsmetoder och gaser bör undersökas.

Ett första framtida steg mot allmän tillämpning av detta system bör omfatta uppskalning av tillverkningsprocessen, vilket kräver samarbete med industrin.

## Slutsatser

- Delvis ersättning av Portlandcement med nanomodifierad SmartCem (Portlandcement med in situ-syntetiserade kolnanofibrer) möjliggör produktion av murbruk med självvåkännande egenskaper.
- SmartCem-sensorerna kan mäta förändringar av töjning, spänning, temperatur (>40 °C) och fuktighet samt detektera sprickbildning.
- Sammansättningen av murbruket som används för att tillverka sensorer, det vill säga W / C-förhållande, typ av cement, ytterligare SCM, kemiska tillsatser, fin sand, kan vara densamma som i betongen som ska övervakas, vilket gör att sensorerna och den övervakade betongen åldras i samma takt (långsammare).

Framtidsplaner: ^

- Installation av systemet på fler konstruktioner broar Sverige.
- Forskning om uppskalning av SmartCem-tillverkningen.
- Forskning om övervakning av miljöpåverkan med SmartCem-sensorer.
- Långtidsövervakning av bron i Pajala.

## Litteratur

"Piezoresistive load sensing and percolation phenomena in Portland cement composite modified with in-situ syntetized carbon nanofibers" Buasiri, T., Habermehl-Cwirzen, K., Krzeminski, L., & Cwirzen, A., Nanomaterials, 9(4) den 10 april 2019.

"Kolnanofibers roll på murbrukets elektriska resistivitet under tryckbelastning", Buasiri, T., Habermehl-Cwirzen, K., Krzeminski, L., & Cwirzen, A., Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1–6 den 10 september 2020.

"Nya fuktighetssensorer baserade på nanomodifierad Portlandcement" Buasiri, T., Habermehl-Cwirzen, K., Krzeminski, L., & Cwirzen, A. Nature Scientific Reports, 1–10 den 14 april 2021.

Buasiri, T., 2023, " Sensing capability of nanomodified Portland cement composites", Luleå tekniska universitet, doktorsavhandling