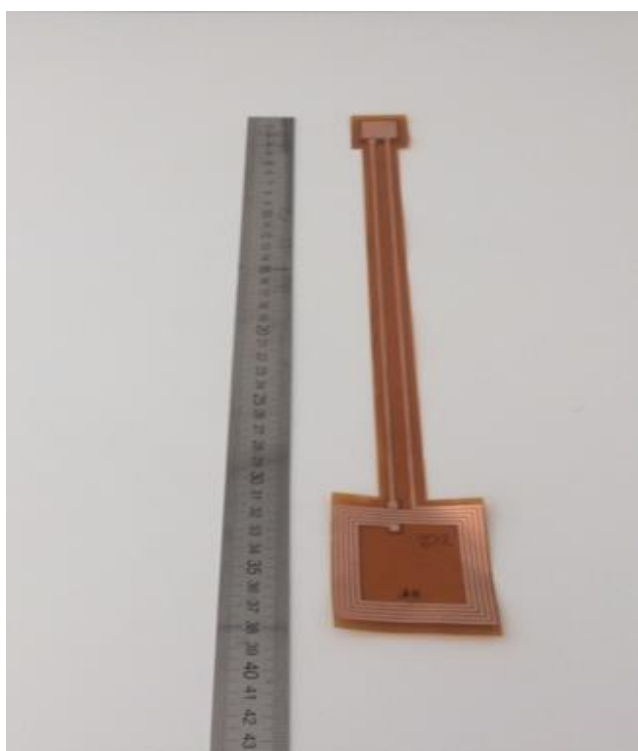


NY FUKTSENSOR FÖR BETONGGJUTNING



Jan Strandberg

2018-10-26

FÖRORD

I denna rapport presenteras resultaten från projektet ***Ny fuktsensor för betonggjutning (ID13774)***, som drivits i samarbete mellan akademi, företag, branschorganisationen Sveriges Byggindustrier och Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond. Projektet är ettårigt och startade den 1 november 2017. Initiativtagare är PEAB och det experimentella arbetet har huvudsakligen utförts av InviSense AB och RISE Acreo AB¹.

Medverkande i projektet:

Lunds tekniska högskola	Magnus Åhs
RISE Acreo AB	Jan Strandberg, Anurak Sawatdee
Sveriges Byggindustrier	Ted Rapp, Per Åhman
FuktCom	Nicklas Sahlen
InviSense AB	Björn Garplind, Anders Friberg
NCC Sverige AB	Mikael Kläth
PEAB	Masis Sarkisian, Andreas Furenberg
Skanska	Hans Hedlund
Thomas Betong AB	Mats Karlsson
Tuvebygg	Leif Einarsson

Vi vill tacka Svenska Byggbranschens utvecklingsfond, vars finansiering gjort det möjligt att genomföra projektet.

Juni 2018

Jan Strandberg

¹ Från och med 1 september 2018 så har all verksamhet i RISE Acreo förts över i moderbolaget i RISE Research Institutes of Sweden AB.

SAMMANFATTNING

Projektet syftar till att utveckla en sensor för monitorering av den relativa fuktigheten (RF%) i gjuten betong under härdningstiden. Utgångspunkten är att modifiera en sensor av den typ som idag tillverkas av InviSense och som kan avläsas trådlöst med en handhållen läsare. Sensorkretsen består av en sensor förbunden med en antenn. För att fungera i den tänkta applikationen måste sensordelen separeras från antenndelen, så att sensorn kan gjutas in i betongen på önskat djup, medan antenndelen ligger utanför betongen. Skälet till att antennen inte kan gjutas in tillsammans med sensorn är att kommunikationen då störs ut av joner i betongen.

En prototyp har tagits fram och testats experimentellt. Försöken visar att sensorn inte påverkas kemiskt av den kraftigt basiska miljön i betongen. Vi har också bekräftat att signalen från sensorn (en resonansfrekvens) kan läsas ut genom betongen och att frekvensvärdet ändras med betongens fukthalt. Den erhållna signalen ligger dock utanför den befintliga läsutrustningens känslighetsområde, vilket är olämpligt, då denna är anpassad för att arbeta i ett tillåtet frekvensintervall. Detta kan lösas genom att kretsens design modifieras så att inverkan från betongen minimeras. Vi bedömer att metoden är både billigare och snabbare än den verifierade RKB-metod, som används idag.

Då InviSense bedömer att det finns goda möjligheter att kunna utveckla en mätmetod som kan användas i industriell/kommersiell verksamhet, rekommenderar vi ett fortsatt utvecklingsprojekt, där sensorn utvecklas vidare och testas i olika typer av betong.

INNEHÅLL

INTRODUKTION	4
INVISSE FUKTSENSOR	5
RESULTAT	7
MODIFIERING AV SENSORKRETSEN	7
TILLVERKNING OCH TEST	8
SLUTSATSER OCH REKOMMENDATIONER	11
APPENDIX	12
MODELLERING AV SENSORN I BETONG:	12

INTRODUKTION

Vid gjutning av betong är det viktigt att veta när betongen är tillräckligt torr att tåla belastning. En metod för att göra detta, som är godkänd av Rådet för byggkompetens (RBK), bygger på att ett hål borrar i betongen. Ett rör sticks sedan ner i hålet, som tätas mot den omgivande atmosfären, och den luftfuktighet som uppstår i röret mäts upp. Metoden är både tidsödande och kostsam och det är önskvärt att kunna göra det på ett enklare sätt.

InviSense har utvecklat en fuktsensor som kan detektera fukt inuti konstruktioner, t.ex. under tätskikt. Sensorn, som består av en sensordel och en antenn, läses av trådlöst med hjälp av en handhållen läsare, se Figur 1. Läsavståndet beror av den omgivande miljön, men är typiskt ca 15cm. Om en sensor av denna typ kan gjutas in i betong och läsas av trådlöst skulle det innebära en avsevärt enklare och billigare metod än den som används idag för fuktmätning i betong.



Figur 1 Sensor (t.v.) som avläses med en handhållen läsare.²

InviSense har testat att gjuta in sin standardsensor i betong med låga vatten-cement-tal (VCT). Vid dessa tester har det inte varit möjligt att läsa ut något värde från sensorn. En möjlig orsak är att sensorn inte klarar den starkt basiska miljön i betongen. Troligare, dock, är att kommunikationen med sensorn störs ut av joner i betongen. Det senare problemet kan lösas genom att sensordelen separeras från antenndelen, så att endast sensorn gjuts in i betongen medan antennen ligger utanför.

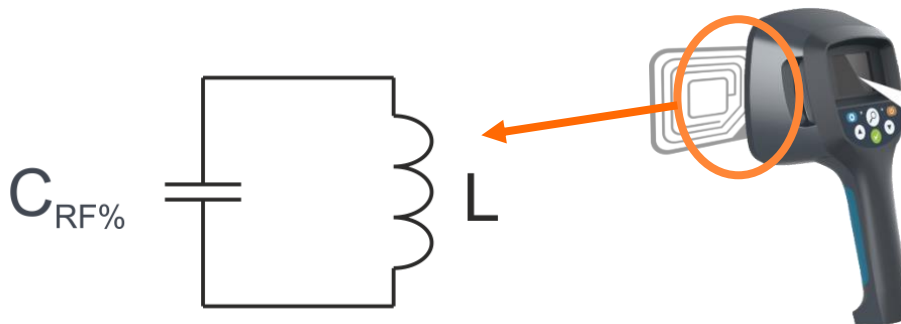
Detta projekt syftar till att anpassa Invisense fuktsensor för mätning av fukt i betong. Sensorer har designats, tillverkats, gjutits in i betong och karakteriserats. Målet med projektet är att avgöra om konceptet fungerar i den tilltänkta applikationen.

² <http://affarsstaden.se/esb-news/indentive-och-invisense-fortsatter-samarbetet/>

INVISENSE FUKTSENSOR

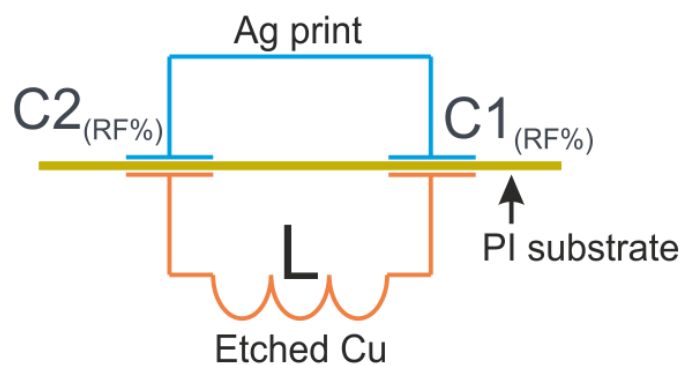
InviSense fuktsensor är baserad på en passiv mätning av resonansfrekvensen i en LC-krets. Att mätningen är passiv innebär att man inte behöver någon inbyggd energikälla i sensorn, såsom till exempel ett batteri. Den energi som krävs för att utföra mätningen tillförs vid mätningen av den handhållna läsaren. Sensorkretsen (se Figur 2) utgörs av en kondensator vars kapacitansvärde ($C_{RF\%}$) starkt beror av den omgivande fuktnivån, och en antenndel, som utgörs av en induktans, L . Om man seriekopplar en kondensator $C_{RF\%}$ med en induktor L i ett slutet lopp har kretsen en resonansfrekvens f enligt nedan ekvation:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_{RF\%}}} \quad \text{Ekvation 1}$$



Figur
Vid

Fultsensorn



Figur

Det egentliga sensormaterialet utgörs av PI-substratet. PI används ofta i kommersiella fuktsensorer. PI absorberar förhållandevis mycket vatten för att vara en plast, upp till 2% av den egna vikten. Absorptionen är proportionell mot luftfuktigheten. När vatten absorberas ändras polyimidens elektriska egenskaper. Speciellt ändras dielektricitetskonstanten (ϵ),

vilket i sin tur inverkar på kretsens kapacitans⁴ och därmed också resonansfrekvensen

e
n
l
i
g
t

R
E
F

–
R
e
f
5
2
3
8
3
6
3
0
3

\
h

\
*

M
E
R
G
E

^FKapacitansen C för en plattkondensator ges av $C \propto \epsilon \frac{A}{d}$ där A är plattarean, d avståndet mellan plattorna och ϵ dielektricitetskonstanten.

R
M
A
T

UTFALL AV FÖRSTUDIEN

Modifiering av sensorkretsen

För att InviSense fuktsensor ska fungera i den tilltänkta applikationen måste den modifieras. Följande krav måste mötas:

1. Sensorn måste tåla hanteringen vid ingjutning och den kraftigt basiska miljön i den gjutna betongen
2. Kommunikationen får inte störas av joner i betongen
3. Sensorkretsens resonansfrekvens bör ligga inom ett frekvensband, som är tillåtet att använda⁵.

Normalt limmas sensortaggen fast på en yta med hjälp av ett adhesiv, som applicerats mot kopparlagret. Ag-mönstret exponeras mot luften som ska mätas. Som tidigare nämnts trycks ett UV-härdande bläck över Ag-lagret, för att skydda det mot mekanisk påfrestning. När taggen gjuts in i betong kommer den i kontakt med en starkt basisk vätska och det finns en risk att denna etsar metallagren. I försöken som beskrivs nedan är kopparlagret överlimmat med en skyddsfilm, medan Ag-lagret, liksom tidigare, övertrycks med ett UV-bläck. Två olika bläck har testats: ett transparent bläck (Dupont 5018A) och ett vitt bläck (Marabu USVW).

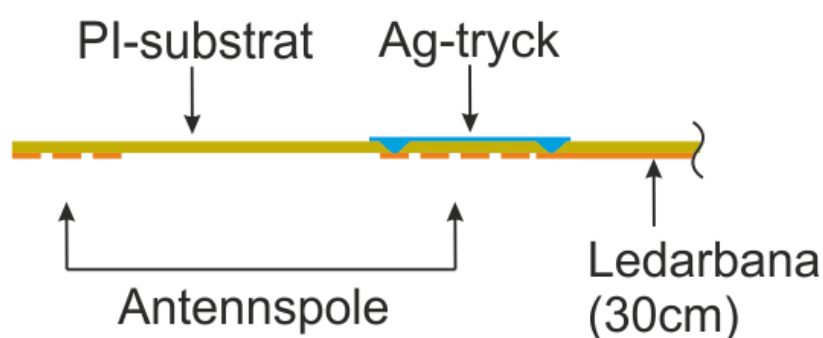
För att möta det andra kravet har en ny design tagits fram, där kondensator och spole separerats från varandra. Tanken är att sensordelen (kondensatorn) gjuts in i betongen på önskat djup medan antennen (spolen) ligger utanför betongen. Det önskade mätdjupet är 15cm. De båda komponenterna separerades 30cm, vilket ger en god marginal, se Figur 4. Av praktiska skäl gjordes försöken dock vid mätdjup i intervallet 2-6cm.



Figur 4 Sensortag med sensordelen (för ingjutning) till vänster och antenndelen (för kommunikation) till höger. Antennens inre ände är förbunden med den långa ledarbanan i koppar via två genomföringar (Ag-trycket till höger). Den totala längden är 380mm.

⁵ Vi siktar mot samma frekvensband som används i InviSense befintliga läsare, runt 8.1MHz

Eftersom spole och kondensator separeras, används i denna konstruktion endast en kondensator, i InviSense standardsensor finns normalt två kondensatorer. För att sluta kretsen krävs genomföringar genom substratet. För detta ändamål etsades vior genom substratet med hjälp av laser, se Figur 5. Endast PI avverkas, då processen avstannar vid kopparlagret. Laseretsningen lämnar kvar en del kolrester i hålen. Dessa kan enkelt torkas bort. I en industriell produktionsprocess kommer en mekanisk rengöring av att hålen behövas. Viorna fylls och förbinds med ett silvertryck. En lämplig viastorlek utprovades experimentellt till 2×2 [mm]. Den tryckta kondensatorplattan av Ag förbands med ledarbanan av koppar på liknande sätt.



Figur 5 Tvärsnitt av substratet. Ag-trycket (blått) förbinder antennspolens innersta varv med den långa ledarbanan genom två vior som etsats genom PI-substratet.

Den nya designen måste anpassas för att ge en resonans i rätt frekvensintervall. Olika designer för såväl antenn (med och utan 30cm ledarbanor) som kondensator utprovades genom beräkningar och karakteriseringar av speciella testdesigner som tryckts på PET-film.

Tillverkning och test

Sensorerna tillverkades på PI/Cu-laminat (15µm Cu folie på 50µm PI, Skultuna Flexible). Kopparsidan mönstrades och våtetsades hos en underleverantör (Beneli). Sex ark mönstrades, där varje ark innehåller 5 sensorer. Vior etsades med CO₂-laser (30mW). Hålen torkades rena från kolrester. Därefter screentrycktes silvermönstret (5029 Dupont) på den sida som laseretsats och torkades i bandugn vid 130°C. Silvermönstret övertrycktes med ett UV-härdande bläck (5018, Dupont eller USVW, Marabu). En plastfilm laminerades sedan på arkens kopparsida, för att skydda kopparmönstret och för att göra sensortaggen styvare och därmed lättare att hantera. Sensorerna skars ut med skärplotter. Inalles tillverkades 30 sensorer, 15 med vardera typ av skyddslager.

Viakontakten uppmättes på de tillverkade proverna. Kontakten fallerade på 20% av proverna. Detta beror troligen på problem med stegtäckningen i viahållet när Ag-lagret trycks. Vi tror att detta kan lösas med processoptimering. Sensorerna acklimatiserades i kontrollerad labmiljö (39% RF) över natten och lästes därefter av med en läsare från InviSense. Flertalet gav mätvärden i intervallet 43%-45%. Eftersom frekvenskurvan är rak, så ger det samma differens även om RF% hade varit högre. De något för höga mätvärdena

beror på den specifika mätuppställningen, något som inte bör vara ett problem om vi kontrollerar sensorns närmaste omgivning.

Beskrivning av experiment, underlaget för slutsaten

Sex sensorer gjöts in i betong (Basbetong VCT 55, Swerock) hos InviSense. Monteringens gjordes i tre plastlådor, där monteringsdjup för sensordelen och sensortyp varierades enligt Tabell 1.

Tabell 1 Experimentdesign

Plastlåda	Monteringsdjup	Antal sensorer med Dupont 5018	Antal sensorer med Marabu UVSW
Plastlåda 1	2cm	1	1
Plastlåda 2	4cm	1	1
Plastlåda 3	6cm	1	1

Mätningar gjordes med InviSense fuktskanner. Inledningsvis kunde ingen signal registreras. Detta beror på att fukthalten inledningsvis är alltför hög. Efter tre dagar kunde en signal detekteras. Resonansfrekvensen låg dock under läsarens lägsta frekvens 7,6MHz. En omprogrammering av läsaren gjordes så att läsning var möjlig ner till 7,1MHz, men också detta var för högt för sensorn. Signalen kunde visserligen detekteras, men resonansstoppen låg fortfarande utanför området. Den låga resonansfrekvensen beror på att sensorkretsen påverkas elektriskt av den fuktiga betongen. Invisense såg under de inledande mätningarna att resonansfrekvensen ändrades under den tid som betongen torkade.

Efter fyra veckor gjordes en elektrisk karakterisering på RISE Acreo, med en frekvensanalysator, som kopplades in direkt på ledarna mellan kondensatorn och spolen efter att den laminerade skyddsfilm avlägsnats, se Figur 6.



Figur 6 Två sensorer ingjutna i betong anslutna till en frekvensanalysator med mätkablar (svarta). Mätuppställningen stabiliseras genom att antenner och kablar monterats på två pappskivor.

Frekvensanalysatorn mäter resonansfrekvensen samt det s.k. Q-värdet. Q-värdet är ett mått på kretsens elektriska förluster. Dessa är primärt resistiva. Ett högt Q-värde innebär små förluster. Q-värdet påverkar läsavståndet vid trådlös avläsning. Ju högre Q-värde, desto längre kan läsavståndet vara. Resonansfrekvensen var 6,70 MHz och Q-värdet ca 3. Före ingjutning var Q värdet ca 30. Förklaringen till den låga resonansfrekvensen samt det låga Q värde är att betong leder ström. Betong leder ström, primärt beroende på att det finns vatten och mycket joner i betongen. Någon signifikant skillnad mellan de båda skyddslagren kunde inte observeras.

En modellering av sensor och betong har gjorts, se Appendix. Enligt denna bör det vara möjligt att modifiera designen så att resonansfrekvensen hamnar inom läsarens normala frekvensintervall.

SLUTSATSER OCH REKOMMENDATIONER

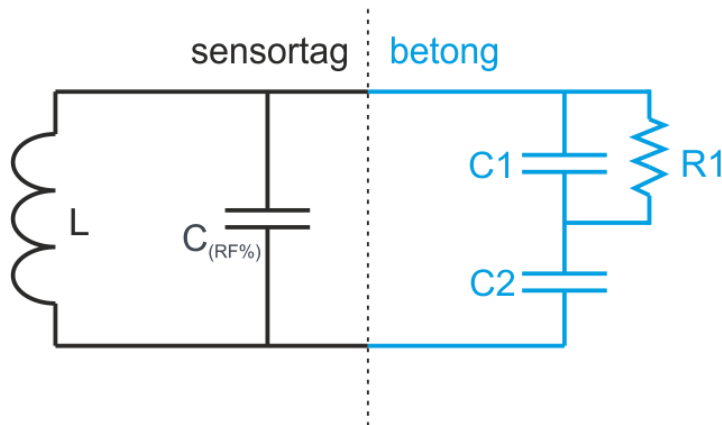
Vi har visat att InviSense fuktsensor fungerar och ger ett mätvärde i den tilltänkta applikationen. En signal har kunnat utläsas efter ingjutning i betong. Den basiska miljön har inte orsakat någon påtaglig skada på sensorn. Mätfrekvensen är lägre än normalt och mätavståndet något reducerat. Skälet till detta är att betong är elektriskt ledande när den innehåller vatten. Vi uppskattar att vi genom en designförändring kan uppnå önskad mätfrekvens och att läsavståndet kan förbättras.

InviSense bedömer att det finns goda möjligheter att kunna utveckla en mätmetod som kan användas i industriell/kommersiell verksamhet. Vi rekommenderar därför ett fortsatt utvecklingsprojekt, där sensorn optimeras och testas i olika typer av betong. Mätresultaten bör då verifieras av och kalibreras mot den metod som används idag. Vidare bör sensorns tålighet mot basiska miljöer undersökas mer systematiskt, även om de inledande försök som gjorts i detta projekt är lovande eftersom det går att läsa ut ett RF% - värde.

APPENDIX

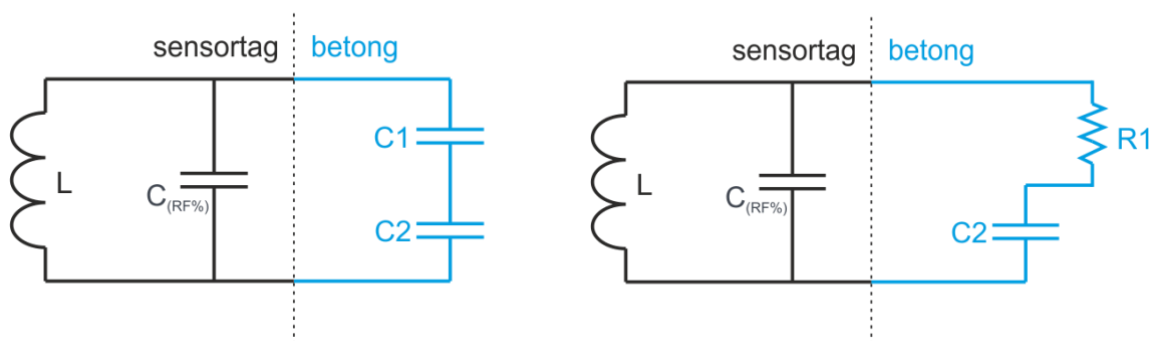
Modellering av sensorn i betong:

Betong innehåller joner. Detta innebär att den inte fungerar som en isolator, utan att den ger ett bidrag till sensorkretsen. En förenklad modell för det totala systemet, när sensorn gjutits in i betongen visas i Figur 7. L är induktansen i spolen (antennen), $C_{RF\%}$ är kapacitansen i sensorplattan, $C2$ är kapacitansen mellan kretsens metallytor genom betongen och $R1$ och $C1$ är resistans och kapacitans genom betongen.



Figur 7 Ekvivalensrets för sensorn ingjuten i betong. Till vänster (svart) sensortaggens induktor (L) och kondensator ($C_{RF\%}$). Till höger (blått) kapacitanser mot sensorns metallytor ($C2$) samt kapacitans (och resistans genom betongen ($C1$ och R)).

$C_{RF\%} > C2 \gg C1$. I nuvarande design uppskattar vi att $C2 = C_{RF\%}/2$. I de fall betongen är mycket torr eller mycket fuktig kan kretsen i Figur 7 förenklas, se Figur 8.



Figur 8 Ekvivalensrets för sensorn ingjuten i betong i de båda extremfall då betongen är mycket torr (till vänster) och mycket fuktig (till höger).

Fall 1 Torr betong När R_1 är stort kan resistansen likställas med ett avbrott. I den resulterande kretsen kommer $C_{RF\%}$ att dominera över de andra kapacitiva bidragen eftersom $C_1 \ll C_{RF\%}$.

Fall 2 Mycket fuktig betong När R_1 är litet förbikopplas C_1 . Den totala kapacitansen får då signifikanta bidrag från både $C_{RF\%}$ och C_2 . Med $C_2 = C_{RF\%}/2$ kan resonansfrekvensen beräknas till 6,2MHz.

Betongen, som aldrig blir helt torr, är ett dåligt dielektrika med stora förluster. Om layouten av sensorn optimeras, så att C_2 minimeras i förhållande till $C_{RF\%}$ blir den mindre känslig för omgivningens (betongens) inverkan. Man kan exempelvis öka avståndet mellan de båda långa ledarbanorna, och det bör också vara gynnsamt att öka sensorkondensatorns yta. I de försök som gjordes uppmättes ett frekvensskifte på 900kHz och ett Q-värde på 3. En tentativ beräkning ger vid handen att inverkan från betongen efter en designförändring minskas markant och att motsvarande värden då bör hamna på 100kHz och $Q=15$. Detta skulle innebära att InviSense fuktscanner kan användas utan modifiering, dvs i ett tillåtet frekvensband.