



LUND UNIVERSITY

Trådlös mätning av temperatur i nygjuten betong : litteratur- och experimentell fältstudie

Sjöberg, Anders; Gerstig, Michael

2009

[Link to publication](#)

Citation for published version (APA):

Sjöberg, A., & Gerstig, M. (2009). *Trådlös mätning av temperatur i nygjuten betong : litteratur- och experimentell fältstudie*. (Rapport TVBM; Vol. 3149). Avd Byggnadsmaterial, Lunds tekniska högskola.

Total number of authors:

2

General rights

Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

Read more about Creative commons licenses: <https://creativecommons.org/licenses/>

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

LUND UNIVERSITY

PO Box 117
221 00 Lund
+46 46-222 00 00

LUNDS TEKNISKA HÖGSKOLA
FUKTCENTRUM VID LUNDS UNIVERSITET

Avd Byggnadsmaterial & FuktCentrum

Trådlös mätning av temperatur i nygjuten betong

Litteratur- och experimentell fältstudie

Anders Sjöberg
Michael Gerstig

ISRN: LUTVDG/TVBM--09/3149--SE (1-40)

ISSN: 0348-7911 TVBM

Lunds Tekniska Högskola
Byggnadsmaterial
Box 118

221 00 LUND

Tel: 046-2227415
Fax: 046-2224427
www.byggnadsmaterial.lth.se
www.fuktcentrum.se

Förord

Föreliggande rapport är skriven på avdelningen för Byggnadsmaterial vid Lunds Tekniska Högskola, som även ingår i FuktCentrum vid Lunds Universitet.

Arbetet har utförts inom det svensk/finska projektet INDUCO – An industrial concreting process – tools for monitoring, process control, product identification and data storage.

Projektgruppen för denna delstudie har varit Peter Weywadt, Sydsten samt Michael Gerstig och Anders Sjöberg på Avd Byggnadsmaterial, LTH.

Den trådlösa mätutrustningen som använts i studien har tagits fram av Electro-Tech i Kalix. Där har Juha Rajala, Johan Carlberg och Urban Clason varit kontaktpersoner och skött all användarsupport.

Projektledare för den svenska delen av INDUCO har varit Ronny Andersson på Cementa.

Dessutom har Örjan Petersson och Göran Resare på Strängbetong, Jonas Boy på Sydsten samt Lars-Olof Nilsson och Lars Wadsö på avd Byggnadsmaterial, LTH ingått i referensgruppen för denna delstudie.

Den svenska delen av INDUCO har finansierats av Vinnova, Sydsten, Cementa AB och Lunds Universitet.

Den finska delen har finansierats av TEKES, Lohja Rudus, Consolis Technology och VTT.

Lund, december 2009

Lektor. Anders Sjöberg
Projektledare INDUCO Task 4

Innehåll

Sammanfattning	2
Inledning.....	4
1 Litteraturstudie Radiovågor.....	5
1.1 Teori	5
1.2 ISM-banden	6
1.3 Radiovågor i betong	6
1.4 Litteraturtips	9
2. State of the art	10
2.1 I-Q tag	10
2.2 MEMS och Smartdust	10
2.3 SensoByg.....	10
2.4 Antenner	11
3. Fältstudier.....	12
3.1 Första fältstudien	14
3.1.1 Provplats och gjutform	14
3.1.2 Montering av mätnoderna i gjutform	15
3.1.3 Avläsning av Temperaturer	16
3.1.4 Observationer	19
3.1.5 Kommande arbete	19
3.2 Andra fältstudien	20
3.2.1 Provplats och gjutform	20
3.2.2 Montering av mätnader i gjutform	20
3.2.3 Avläsning av Temperaturer	21
3.2.4 Avläsning av RF	24
3.2.5 Sammanfattning av mätresultaten	24
3.2.6 Observationer och erfarenheter	25
3.2.7 Kommande arbete	25
3.3 Tredje fältstudien.....	26
3.3.1 Provplats och gjutform	26
3.3.2 Montering av mätnader och gjutning	26
3.3.3 Avläsning av Temperaturer	27
3.3.4 Observationer och erfarenheter	28
3.3.5 Kommande arbete	29
3.4 Fjärde fältstudien.....	30
3.4.1 Provplats och gjutform	30
3.4.2 Montering av mätnader och gjutning	31
3.4.3 Placering av avläsningsenhet	32
3.4.4 Avläsning av Temperaturer	34
3.4.5 Observationer	35
4. Diskussion och slutsatser	36
4.1 Signalöverföringens räckvidd	36
4.2 Avläsningsenhet	37
4.3 Mätnader	37
5 Fortsatt utvecklingsarbete	39
6. Referenser.....	40

Sammanfattning

I december 2006 startade INDUCO-projektet, med syfte att utveckla och tillämpa tekniker för övervakning och kontroll av betongproduktion. En av dessa tekniker är förutbestämt i projektansökan, vilken är trådlös sensormätning ingjuten i betong. Behovet och värdet av trådlös sensormätning har uppmärksamats av betongproducenter över hela världen, och påpekas bl.a. av USA:s betongindustri i deras färdplan för framtiden "Roadmap 2030" (2002).

Trådlös sensormätning används idag i stor omfattning för många, vitt skilda, användningsområden. Exempel på dessa är övervakning av kollektivtrafik, nivåmätning i cisterner samt temperatur och ånghaltsmätning i växthus. Trådlösa sensorer går att finna i de flesta stora industrier idag.

Även inom betongindustrin kan vi idag finna användandet av trådlösa sensorer, t.ex. i logistiska sammanhang vid övervakning av betongbilar. Men det som är av större intresse för betongindustrin idag är att ha bättre kontroll av produkten i sig, d.v.s. den färska och den härdade betongen. Trådlösa sensorer ingjutna i betong skulle potentiellt kunna mäta viktiga egenskaper såsom temperatur, relativ fuktighet, konsistens m.m. på ett kontinuerligt vis samt sända denna information antingen kontinuerligt eller vid behov.

Ingen av de idag kommersiellt tillgängliga systemlösningarna för trådlös sensormätning kan användas för ingjutning av betong på det vis som beskrivits ovan. För att en sådan lösning skall vara möjlig, måste ett antal hinder överstigas. De huvudsakliga problemen som måste lösas berör: strömförsörjning, livslängd och signalstyrka. Den inledande litteraturstudien syftar till att ge viss allmänbildning om dessa problem. Förhoppningsvis kan denna studie vara en starthjälp vid vidare forskning inom detta ämne.

Inom projektet har två olika systemlösningar för sensornätverk utvärderats i fältmätningar. Systemen benämns med produktnamnet CrayCom och är utformade och framtagna av Electrotech, Kalix och de har en stjärnverksstruktur som innebär att ett antal (ingjutna) mättnoder skickar data till en centralt placerad avläsningsenhet. Kommunikationen mellan mätnoderna och avläsningsenheten, i de olika systemen, sker via "radiosignal" på 868MHz, "magnetsignal" på 125 kHz eller en kombination av dessa båda.

Systemen har utvärderats i sammanlagt fyra olika fältförsök. Jämförelse har gjorts med ett sedan länge kommersiellt tillgängligt system med ingjutna ledningar benämnt Betongdatorn. Samtliga fältmätningar har genomförts utomhus utan klimatskydd, antingen vid en betongstation eller på en byggarbetsplats under vanliga (bistra) klimatförhållanden.

I korthet kan resultaten och erfarenheterna från fältmätningarna sammanfattas punktvis:

- Hårdvaran i form av mätnoderna och avläsningsenhet har varit robusta och lätta att hantera. Fastsättning, klimatbelastningar, tuff miljö på byggarbetsplatser etc har inte vållat några som helst problem under något av fältförsöken.
- Mjukvaran har däremot varit svår att hantera, det har krävts mycket telefonsupport för att starta och avläsa systemet. Det är uppenbart att mjukvaran ligger i ett tidigt utvecklingsskede och att den behöver utvecklas ytterligare. I den slutliga produkten bör mjukvaran utformas så att den inte behöver ”startas upp” och ”ställas in” på mätplatsen.
- Livslängden hos utrustningen vad gäller strömförsörjningen har inte skapat några problem alls. Samtliga mätnader har varit batteridrivna och klarat mätning och sändning av data i någon vecka som de längsta mätningarna varat. Även avläsningsenhetens batterikapacitet har varit fullt tillräcklig i de fall den varit batteridrivna
- Överföring av data från mätnoderna till avläsningsenheten har upplevts som det kritiska momentet i samtliga fältundersökningar. Det har näst intill varit omöjligt att överföra filer med mätdata från mätnoderna via radiosignal (868MHz). Inte ens kraftfulla riktantennor har hjälpt nämnvärt. Överföring av enstaka mätvärden via magnetsignal (125 kHz) har däremot skett utan problem genom 50 cm armerad betong. Men dock inte längre än några enstaka meter från konstruktionen. Erfarenheten är därför att kontinuerlig överföring av enstaka mätvärden från mätnoderna och lagring i avläsningsenheten är att föredra före lagring av mätvärdena i mätnoderna.
- Överföring av mätdata från avläsningsenheten via GSM-modul till server för presentation på webbplats har fungerat utan problem. Automatisk överföring av mätdata via GSM-modul är en vedertagen teknik som i kombination med presentation på en webbplats ger en mycket bra åtkomst av mätdata för olika parter.
- Samtliga mätsystemen som utvärderats följer temperaturförloppen väl med jämförande mätningar med BetongDatorn. Dock finns det en systematisk skillnad i absolutvärdet där CrayCom stadigt ligger ca 1°C lägre än BetongDatorn. Denna skillnad har bara konstaterats, men ännu inte kunnat förklaras.

Det står klart att överföringen av data från mätnoderna till avläsningsenheten är den enskilt viktigaste delen att gå vidare med för att få ett fungerande system. Därefter måste mjukvarans utvecklas så att hanteringen av systemet blir avsevärt mer användarvänligt. Avslutningsvis så behöver även systemet för presentation på webbplatsen och stödet för beslutfattande utvecklas.

Inledning

Idag finns det kommersiella avancerade system för trådlös sensormätning. Dessa går dock inte att använda ingjutna i betong på ett tillfredställande sätt. Det är svårt att lokalisera sensorerna igenom flera decimeter av tät betong. Informationen som sänds från sensorerna kommer inte alltid fram intakt. Batteritiden hos sensorerna är inte alltid tillräcklig för att sensorn skall vara funktionell i flera år. Sist men inte minst så är påfrestningarna stora under ingjutningen och miljön i betongen mycket alkalisk, och långt ifrån alla sensorer klarar av den belastningen och en sådan miljö under en längre tid.

Alla nämnda hinder måste bemästras innan vi har ett färdigt kommersiellt gångbart system. Idag utförs arbete runt om i världen mot att lösa dessa problem. Vid avdelningen för byggnadsmaterial vid Lunds Tekniska Högskola har forskning med trådlösa sensorer inom byggindustrin genomförts under flera år av Sjöberg & Blomgren (2004), Sjöberg et al (2007).

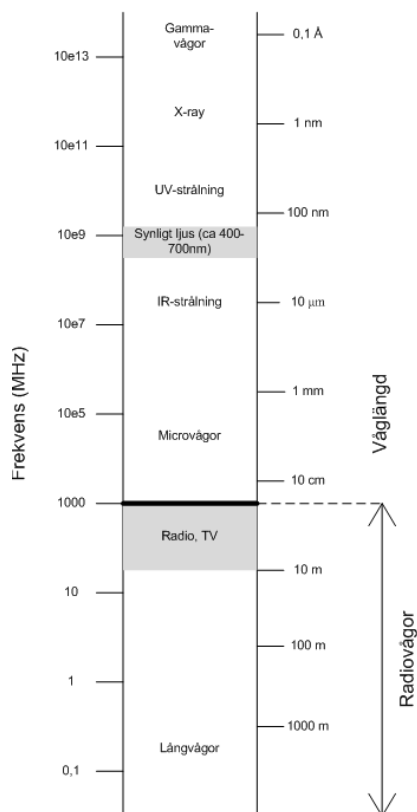
Denna rapport består av två delar, den första delen utgörs av en litteraturstudie om radiovågors fortplantning i betong, kapitel 1 och 2. Litteraturstudien har använts som bakgrundskunskap i projektet för att kunna utvärdera mätresultat och utveckla de trådlösa mätsystem som sedan utvärderats i fältmätningar.

Den andra delen utgörs av fyra fältmätningar av trådlösa mätsystem för temperaturmätning i betong. Samtliga system som använts var framtagna och utvecklade inom ramen för projektet. Utrustningen har utvecklats kontinuerligt och stegvis, främst med avseende på dataöverföringen, genom att använda erfarenheter från tidigare mätningar. Erfarenheten från handhavande och prestanda hos utrustningen, som förvärvats i den första fältmätningen, ligger till grund för utformningen av systemet som används i den andra fältmätningen osv.

1 Litteraturstudie Radiovågor

1.1 Teori

All kommunikation ifrån trådlösa sensorer sker med radiovågor. Radiovågor är ett namn på de elektromagnetiska vågor som återfinns i radiofrekvensspannet i det elektromagnetiska spektrumet med våglängd från ca 10 cm och längre, se figur 1.



Figur 1. Det elektromagnetiska spektrumet.

Radiovågor utgör den del av det elektromagnetiska spektrumet med lägst frekvens, vilket också innebär att de har den längsta våglängden, vilken kan vara bortåt flera kilometer i längd. Lagen om elektronisk kommunikation (SFS 2003:389) definierar radiovågor som elektromagnetiska vågor med frekvenser från 9 kHz till 3000 GHz. Dessa delas i tur in i mindre frekvensspann, som alla har sin egen benämning, se tabell 1.

Tabell 1. Frekvensband för radiovågor.

Namn	Förkortning	Frekvens och våglängd	Användningsområde
Very Low Frequency	VLF	3-30 kHz, 100km-10km	Ubåtskommunikation
Low Frequency	LF	30-300 kHz, 10km-1km	AM (Långvåg) Radio
Medium Frequency	MF	300-3000 kHz, 1km-100m	AM Radio
High Frequency	HF	3-30 MHz, 100m-10m	Amatörradio, RFID
Very High Frequency	VHF	30-300 MHz, 10m-1m	FM-radio, TV-sändningar
Ultra High Frequency	UHF	300-3000 MHz, 1m-100mm	Mikro, mobiltel, w-LAN
Super High Frequency	SHF	3-30 GHz, 100mm-10mm	Mikrovåg, w-LAN, radar
Extremely High Frequency	EHF	30-300 GHz, 10mm-1mm	Radioastronomi
Terahertz	THz	300-3000 GHz, 1mm-90µm	Ersättning för röntgen

Observera att indelningen inte är strikt, och ofta nyttjar ett användningsområde frekvenser som ligger strax utanför de som är angivna i Tabell 1.

Två olika system för trådlös överföring har testats inom ramen för INDUCO-projektet. I den första utav dessa användes en radiosignal på 868 MHz, vilket motsvaras av VHF-bandet. I det andra systemet används en radiosignal på 125 kHz, i LF-bandet. Dessa signaler är båda per definition radiovågor. I fortsättningen kommer vi dock att benämna signalen med den lägre frekvensen, den på 125 kHz, för ”magnetsignal”. Detta är en vanlig benämning i branschen för signaler med låg frekvens. Försök visar att det är lättare att få kontakt med en sensor ingjuten i betong vid den lägre frekvensen. Detta överensstämmer med erfarenheter i branschen. Dock är det få i branschen som förstår anledningen till detta.

1.2 ISM-banden

ISM-banden är licensfria frekvensband som fritt kan användas i forskningsyfte. ISM står för **I**ndustrial, **S**cientific and **M**edical och använder frekvenser runt 0,9, 1,8, 2,4 och 5,8 GHz. För Europa kan den exakta tilldelningen för frekvensband hittas på EFIS:s webbplats (ERO Frequency Information System). Vid forskningsarbete brukar en frekvens i ISM-bandet väljas, för att inte störas av, eller störa, kommersiella tjänster. Undantag kan göras för lågfrekventa signaler med låg signalstyrka, då de sannolikt ej kommer att störa andra tjänster.

1.3 Radiovågor i betong

För att förstå vad som händer när radiovågor transporteras igenom en tjock betongvägg, måste vi ha kunskap om samspelet mellan materia och radiovågor. Radiovågor beter sig nämligen annorlunda när det färdas i ett fast material än när det färdas i luft. I den engelskspråkiga litteraturen talar man om ”**attenuation**” vilket betyder ”förtunning” eller ”dämpning”. En internetsökning på ”attenuation” ger mer information i ämnet. En lika vanligt förekommande term är ”**permittivity**” som istället är ett mått på hur genomsläppligt ett material är för ett elektromagnetiskt fält. Något förenklat kan man säga att ett material med hög ”permittivity” har en låg ”attenuation koefficient” och vice versa.

Det finns två typer av materia som påverkar alla elektromagnetiska vågor; dessa är ledare och isolatorer. En isolator kallas en **dielektrikum** i litteraturen (”dielectric” på engelska). Betong är ett exempel på en dielektrikum. De dielektriska egenskaperna för betong är komplicerade att förstå i grunden, då de varierar med hydratationsgrad, betongsammansättning, kloridhalt,

fukthalt, armering och framför allt frekvensområde. Studier finns på denna egenskap i betong (se nedan).

Ett material uppför sig inte på samma vis vid olika frekvenser. Som exempel kan man jämföra ljusvågor och radiovågor: en bit kartong släpper igenom alla radiovågor men blockerar effektivt ljusvågorna. Att stänga ett fönster blockerar effektivt det högfrekventa ljudet från trafiken, men hindrar inte det lågfrekventa brummet från att komma in i rummet.

När en radiovåg träffar ett material kommer en del av dess styrka att reflekteras vid ytan och en del av styrkan att absorberas av materialet, Richards (2008). Man talar om två effekter: **reflektion** och **absorption**. För en sensor ingjuten i betong, kommer den förtunnande effekten nästan uteslutande att bero på absorption, Jacobs & Owino (2000). Reflektion kan också komma att spela en viss roll i de fall då armeringen i betongen stör radiovågorna, När en radiovåg färdas igenom betong, kommer en del av dess styrka att absorberas och generera värme och en del kommer att komma fram på andra sidan. Absorptionskraften hos ett dielektrikum kallas för dämpningskoefficient ("attenuation coefficient"). Signalstyrkan som färdas igenom en isolator beror dels på tjockleken av materialet och dess dämpningskoefficient. Dämpningskoefficienten tar hänsyn både till reflektion och till absorption.

Den uppmätta intensiteten I överförd genom ett material med tjocklek x har samband med impulsintensiteten I_0 enligt en invers exponentialfunktion som vanligtvis namnges Beer-Lambert lagen:

$$I = I_0 e^{-\alpha x},$$

där x är transportlängden och α är dämpningskoefficienten.

Det är viktigt att notera att dämpningskoefficienten är frekvensberoende, och kommer att skilja sig åt om du studerar ljudvågor, radiovågor eller radioaktiv strålning. En lägre frekvens, vilket innebär en längre våglängd, kommer alltid att absorberas mindre av en betongvägg än en högre frekvens. En lågfrekvent magnetsignal lämpar sig därför bra för ett trådlöst sensornätverk ingjuten i betong. Priset man får betala för detta är att överföringshastigheten blir lägre.

Det finns en del forskning att tillgå kring hur radiovågor uppför sig i betong. Denna forskning berör nästan uteslutande ämnet icke-förstörande testmetoder, vilket brukar benämnas NDT i litteraturen (nondestructive testing). De frekvenser som är aktuella för ämnesområdet rör sig vanligtvis i spannet 50 MHz-1 GHz men både lägre och högre frekvenser förekommer. Observera att NDT också kan använda sig av ultraljud, men dessa studier är inte relevanta för oss då ultraljud inte är en elektromagnetisk våg. Ett annat forskningsområde är betongens avskärmningsförmåga för radiovågor.

Resultaten från de olika försöken är inte alltid entydiga, men några generella observationer ska nämnas.

Frekvens

Helt avgörande för hur mycket en radiovåg dämpas av en betong är radiovågens frekvens. En högfrekvent radiovåg absorberas i högre grad än en lågfrekvent. En studie visar att förlusterna ökar med frekvensen i området 100 kHz – 4 MHz för att därefter ligga på en konstant nivå vid

frekvensområdet 4-40 MHz, Al-Qadi (1995). Vid lägre frekvenser blir absorptionsförlusterna mindre, men reflektionsförluster från armeringen kan komma att spela en roll, Dalke (2000).

Betongens sammansättning

En studie visar att betong med slaggcement dämpar radiovågor något mer än betong med portlandcement. Flygaska har väldigt liten inverkan på dämpningen. Stålfiber i betongen har däremot en signifikant påverkan, och minskar dämpningen vid frekvenser kring 500 MHz, Soutsos (2001). Ballasten har betydelse för dämpningen. En betong med ballast av granit dämpar än en betong med ballast utav kalksten, Al-Qadi (2000).

Hydratationsgrad

Betongens genomsläpplighet för radiovågor minskar med betongens härdning. Detta syns tydligast i tidig ålder, Robert (1998).

Fukthalt

En ökning av mängden fritt vatten i en betong ökar genomsläppligheten för radiovågor och minskar därmed dämpningen. Denna effekt är tydlig för alla frekvenser från 10 MHz till 1 GHz, och har större betydelse än variationer i betongens sammansättning, Soutsos (2001).

Kloridhalt

Kloridhalten i betongen har en betydande effekt på genomsläppligheten. En ökning i kloridjonkoncentrationen ger ökad genomsläpplighet för radiovågor. Detta har störst betydelse vid låga frekvenser. För radiovågor på 1 GHz och högre har kloridhalten försumbar betydelse, Robert (1998).

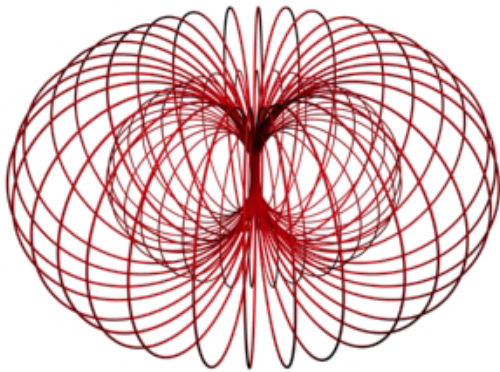
Armering

Armeringsnät i betong kan ha en betydande påverkan på lågfrekventa radiovågor. Generellt kan sägas att detta gäller för radiovågor med en våglängd som är mycket större än avståndet mellan armeringsjärnen, Dalke (2000). Se figur 2.



Figur 2. Armerad bottenplatta och kantavstyvning (vot) till enfamiljshus.

Magnetsignalens vågor sprids i en torusliknande form, se figur 3.



Figur 3. Vågornas utbredning för magnetsignalen (125 kHz).

Även om en lågfrekvent signal är att föredra i en ren betong, pga. mindre förluster, så kan det innebära desto stora förluster i en armerad betong. Detta pga. avståndet mellan armeringsjärnen kan sammanfalla med våglängden, vilket ger upphov till störningar.

Placeringen av sändare och mottagare i ett trådlöst nätverk är av stor vikt. Exempelvis kan en halvmeter tjock vägg verka som en nära en meter tjock vägg vid en 45-graders vinkel. Vid en tvågradig vinkel verkar den som en 14 meter tjock vägg!

När man vill avläsa signalerna är det viktigt att välja avläsningsplats med stor noggrannhet då signalerna kan vara betydligt svagare på vissa ställen, pga. utsläkningsfenomen. Det kan handla om endast delar av vågländer som man behöver flytta för att dessa fenomen skall försvinna. I praktiken kan man behöva prova sig fram för att hitta bästa avläsningspunkten.

1.4 Litteraturtips

För en djupare förståelse av radiovågor rekommenderas boken ”Radio Wave Propagation – And Introduction for the Non-Specialist”, Richards (2008). Den är kanske inte lika lättillgänglig som titeln vill ge sken av, likväl bör den vara av nytta för en tekniskt utbildad person som inte har radiovågor som sitt specialområde. I synnerhet är kapitel sju av intresse för att förstå interaktionen mellan materia och radiovågor.

För en redovisning av de kommersiella nätverkslösningarna som finns på marknaden idag, rekommenderas de två rapporter som är utgivna av avdelningen för byggnadsmaterial, Lunds Universitet Sjöberg & Blomgren (2004) samt Sjöberg et al (2007).

2. State of the art

Det finns idag ett flertal aktörer på den internationella marknaden som tillhandahåller lösningar för trådlösa sensornätverk. De flesta av dessa är utvecklade för att mäta temperatur- och fuktnivå i luften, inuti eller i anslutning till en byggnad. Vanliga tillämpningar är kontorsrum, kylrum, frysdiskar och väderstationer. En genomgång av dessa system finns sammanställda i Sjöberg & Blomgren (2004) samt Sjöberg et al (2007).

Inom ramen för detta projekt gjordes ett besök vid World of Concrete 2009 i Las Vegas, Nevada. På denna mässa som är ledande inom betongbranschen i USA fanns inga lösningar för trådlös mätning av temperatur i betong presenterade. Dock framkom det ett tips om företaget Identec Solutions som arbetar med trådlösa sensorer, RFID tags etc.

2.1 I-Q tag

Identec Solutions har en av allt att döma en fungerande prototyp för trådlös mätning av temperatur. Denna är ännu inte någon kommersiell produkt, och sannolikt ej heller ett system som utformats för mognadsmätning i nygjuten betong. Det är osäkert om ens kapslingen i sitt nuvarande skick klarar att gjutas in i betong, se figur 4.



Figur 4. I-Q tag från Identec Solution

- Trådlös temperaturövervakning
- Batteri med 6 års livslängd
- Frekvens 915 MHz (UHF-bandet)

2.2 MEMS och Smartdust

Microelectromechanical Systems (MEMS) är ett samlingsnamn för extremt små (1-100 μ m) sensorer. Dessa existerar idag för ett flertal applikationer. Ett nätverk av MEMS benämns ibland "Smartdust". En framtidsvision är att kunna utforma ett smartdust-nätverk för ingjutning i betong. Mycket arbete återstår innan detta är möjligt. Bl.a. måste batteriteknologin ta enorma steg framåt innan detta är en verklighet. Omfattande forskning på MEMS och dess användning i betong pågår bland annat vid Alabama A&M University, USA. Norris et al (2008), Saafi (2005).

2.3 SensoByg

Sensobyg är ett pågående danskt forskningsprojekt som syftar till att finna systemlösningar för sensornätverk i byggnader och anläggningar. Visionen är att uppnå ett intelligent och fullt automatiserat byggande i alla faser, där byggnadsdelar och konstruktioner själv ger signal om när de är klara för transport och inbyggnad. De utvecklar och bygger sina egna sensorer. FuktCentrum vid Lunds Universitet är en forskningspartner i SensoByg. För vidare information kan du besöka webbplats för SensoByg (2009).

2.4 Antenner

Antenner för VHF (exempelvis systemet med 868 MHz) är normalt sett dipolära sprötantenner som sänder åt alla håll, utom i axiell riktning. På grund av att antennen sänder åt alla håll minskar signalstyrkan kraftigt med (kubiken av) avståndet. Enkelt uttryckt så tunnas signalen ut då den måste täcka en allt större "klotarea" då avståndet från sändarantennen ökar (klotets radie). En praktisk övre gräns för räckvidden är ca 100 meter vid fri sikt, inom ett smalt band på 868 MHz är det dock tillåtet att sända med en högre effekt vilket ger motsvarande 1000 meter räckvidd.

För att öka räckvidden hos signalen kan antingen effekten ökas, antennens "storlek" ökas eller spridningen av signalen minskas så att utsändningen koncentreras i den riktning mottagaren finns. En ökning av sändarens effekt är bara möjlig upp till en viss nivå, däröver krävs godkännanden för radioutsändning och dyra effekttåligena antennkomponenter. Med trådlösa batteridrivna mättaggar så kommer dessutom batteriets livslängd att minska med ökande sändeffekt.

Storleken på antennen behöver anpassas för den sända frekvensen, så att den överensstämmer med våglängden för att vara effektiv. Normalt sett går man vid en viss storlek över till en antenn med spröt (fiskben) av den typ som ofta används som teveantenn på hustak. Denna typ av antenn kan med fördel både användas för mottagare och sändare och riktas mot varandra.

Parabolantenner är den mest optimala typen för riktad sändning eller mottagning. Vid sändning mellan två parabolantenner så kommer signalstyrkan inte att minska på ovanstående vis utan sändningen kan ske över mycket långa avstånd med fri sikt, upp till tiotals km. Ett problem är att rikta dessa mot varandra, så länge man bara har en mottagare och en sändare så kan man finjustera men till en grupp av 3 eller fler sändare/mottagare krävs motordrivning.

Antenner för LF (exempelvis systemet med 125 kHz) är normalt sett en induktiva loop-antenn som sänder via ett magnetfält. Både sändare och mottagare är uppbyggda på samma sätt och sändningsavståndet beror på en kombination av de båda antennernas prestanda. På liknande sätt som med sprötantenner så sänder loopantennerna åt alla håll och signalstyrkan minskar kraftigt med avståndet. En teoretisk övre gräns för ett batteridrivet system är 20-40 meter när sändarens antenn är \varnothing 80 cm och mottagarens \varnothing 10 cm. Det går naturligtvis att göra antennerna ännu större men \varnothing över 100 cm blir svår att driva elektriskt och otymplig att hantera praktiskt. Den praktiska övre gränsen för ett system där diametern hos sändarens antenn är ca 30 cm och hos mottagarens ca 5 cm är 4-8 meter för ett helt ostört magnetfält.

På motsvarande sätt som för sprötantenner så kan räckvidden ökas, i detta fall främst med högre strömstyrka genom sändarringen, större diameter hos ringen och fler antal varv i lindningen. Dessutom finns det ett lägesberoende hos antennerna på grund av magnetfältets utseende, figur 3. Bäst är förhållanden får om man tänker sig sändar- och mottagarringens magnetfält som två bildäck som är uppträdde genom navet på en stång. Sämsta förhållandet skapas om det ena "däcket" står upp och det andra ligger ned. Man kan, i viss mån, kompensera för läget genom att linda antennerna i "3 dimensioner" ungefär som ett garnnystan men detta kräver dyrare elektronik i antenntgränssnitten.

I båda de ovanstående fallen beror räckvidden av både sändar- och mottagarantennen. Om det finns begränsad batterikapacitet eller utrymme hos sändaren vilket är fallet med en ingjuten mättagg så kan det till viss mån kompenseras genom att öka antennstorleken och antenntvarvtal hos mottagaren.

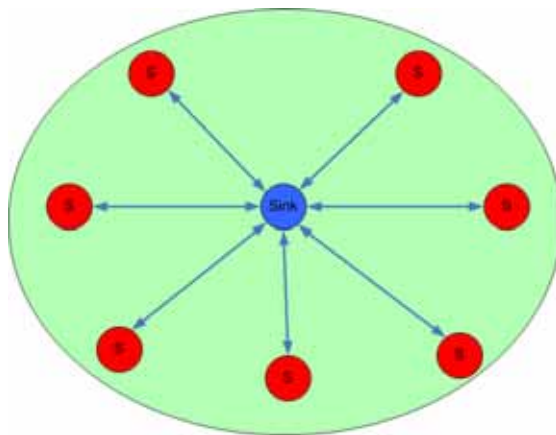
3. Fältstudier

Inom INDUCO-projektet har två olika systemlösningar för sensornätverk utvärderats i fältmätningar. Båda systemen är utformade och framtagna av Electrotech, Kalix. Systemen består i princip enbart av komponenter som finns fritt tillgängliga på marknaden. Samtliga fältstudier i projektet är utförda utomhus i södra Sverige, utan väderskydd.

Jämförelse har gjorts med ett sedan länge kommersiellt tillgängligt system med ingjutna ledningar benämnt Betongdatorn, detta system är utvecklat av Skanska i samarbete med ETM-mätteknik och Vemendo.

De fyra fältmätningarna utfördes i olika typer av gjutetapper som huvudsakligen hade ett annat ändamål, syftet var att komma så nära som möjligt de förhållanden som råder på en byggarbetsplats. Endast i fältstudie tre utfördes gjutningen enbart i syfte att testa mätnoderna i detta projekt. Även här användes dock en gjutform och ett betongrecept som ursprungligen var framtagna för ett annat ändamål.

Alla systemlösningar som använts har haft en så kallad stjärnverksstruktur, se figur 5. Det innebär i korthet att alla mätnader, som består av mätsensor, radiomodul samt eventuellt ett datalagringsminne, kommunicerar direkt med avläsningsenheten. Denna kommunikation kan vara dubbelriktad som i de två första fältförsöken eller bara enkelriktad från mätnoderna in mot avläsningsenheten i mitten, som i de avslutande två fältmätningarna.



Figur 5. Stjärnverksstruktur hos nätverket innebär att alla mätnader (S) kommunicerar direkt med avläsningsenheten i mitten (Sink).

Avläsningsenheten kan innehålla många olika funktioner, det enklaste är att den kopplas upp och styrs av en dator när mätvärdena skall samlas in. Insamlingsenheten har i det fallet inget eget minne utan mätvärdena sparas i mätnodernas minne till det de avläses. Ett annat utförande är att avläsningsenheten har ett minne och kontinuerligt tar mot data från mätnoderna. Detta överförs sedan direkt till en dator via kabel eller till en server via GSM-modul eller liknande.

Fältmätning 1

I den första fältmätningen användes en utrustning som skickade mätdata med radiosignal på 868 MHz, vilket ingår i ISM-bandet. Anrop från avläsningsenheten till mätnoderna skedde dock med 125 kHz. Med denna lösning mättes temperatur och relativ fuktighet i en provgjutning på Sydstens gård. Mätvärdena lagrades i mätnoderna och skickades till avläsningsenheten endast vid förfrågan.

Fältmätning 2

I den andra fältmätningen användes samma mätnoderna som i första försöket men en kraftfullare avläsningsenhet som kopplades direkt till en dator vid avläsning. Med denna lösning mättes temperatur och relativ fuktighet i kantavstyvningen (voten) på en nygjuten betongplatta till ett villabygge. Mätvärdena lagrades även här i mätnoderna och skickades till avläsningsenheten endast vid förfrågan.

Fältmätning 3

I den tredje fältmätningen användes systemlösningar som uteslutande kommunicerade med s.k. magnetsignal på 125 kHz i båda riktningarna. Med denna utrustning mättes temperatur i en provgjutning på Sydstens gård. Denna lösning var programmerad att kontinuerligt skicka iväg mätvärdet till avläsningsenheten efter varje mätning. Oavsett om det fanns en aktiv enhet som tog mot signalerna, eller ej.

Fältmätning 4

I den fjärde fältmätningen användes samma system som i tredje mätningen men denna gång var avläsningsenheten ansluten med en GSM-modul. Med denna lösning mättes temperatur i en gjutetapp på Sydstens gård. Även denna lösning skickade kontinuerligt iväg mätvärdet till avläsningsenheten efter varje mätning. Avläsningsenheten som var ansluten till en GSM-modul sände kontinuerligt vidare mätvärdena till en Internetansluten server i Kalix.

3.1 Första fältstudien

Syfte: Utvärdera system CrayCom med avseende på räckvidd, handhavande samt temperaturnoggrannhet i jämförelse med BetongDatorn.

Utrustning: ID-noder, mätnoder för temperatur samt handinstrument. Betongdator för jämförande mätningar.

Utförande: Montera noderna och betongdator i gjutform, gjuta betong med normalt förfarande. Kontrollera räckvidd samt jämföra temperaturmätningar.

3.1.1 Provplats och gjutform

Studien utfördes på gårdsplanen vid Sydsten AB i Malmö, 2008-10-06. Mätnoderna monterades i en armerad gjutform som ingick i en serie gjutningar med syfte att bedöma olika betongsorter för ett särskilt ändamål för en kunds räkning.

Provformen bestod av en lastpall med en skiva som botten och en 170 mm hög sarg som tillverkats av lösvirke. I provformen fanns en centrumarmering (centrerad i höjddled) som vilade på plastdistanser. Figur 6 och 7.

Alla arbeten skedde utomhus utan klimatskydd.



Figur 6 Gårdsplanen vid Sydsten i Malmö



Figur 7. Provformar bestod av lastpall med sarg.

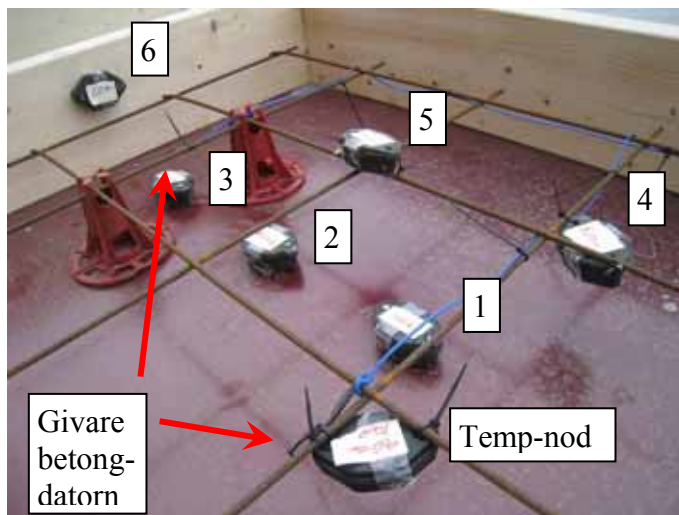
3.1.2 Montering av mätnoderna i gjutform

En mätnod för temperatur monterades med buntband på centrumarmeringen i gjutformen, se figur 3. Intill den delen av mätnoden där temperatursensorn satt monterades en av BetongDatorns givare. Den andra givaren till BetongDatorn monterades på centrumarmeringen någon decimeter från sargen.

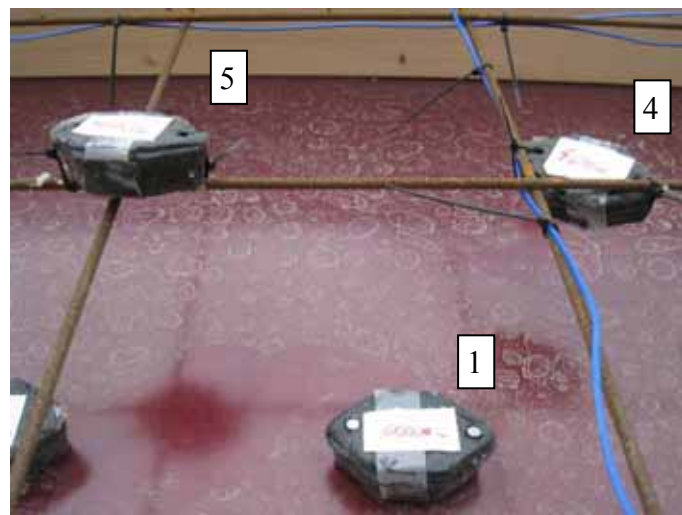
Temperatursensorn inuti mätnoden är monterad intill det vänstra fästhållet då man betraktar noden med loggan rättvänd och lysdioden nedåt.

Sex noder utan givare, så kallade ID-noder monterades i gjutformen. ID-nod nummer 1 – 3 spikades fast på botten på olika avstånd från sargen. Nummer 1 monterades i centrum av provformen och nummer 3 knappt en dm från sargen. Nummer 2 monterades mitt i mellan 1 och 3, se figur 8 och 9.

ID-nod nummer 4 monterades under centrumarmeringen, nära mitten av gjutformen och nummer 5 monterades ovanpå centrumarmeringen, se figur 9. ID-nod nummer 6 spikades direkt på gjutformen mitt på en kortsida. Därefter gjöts betongen, se figur 10 och 11.



Figur 8. Placering av samtliga mätnoder



Figur 9. Id-nod nr 4 under armering och nr 5 ovanpå.



Figur 10. Gjutning med betongrännor samt vibratorstav



Figur 11. Avdrag därefter täckning och brädrivning av yta

3.1.3 Avläsning av Temperaturer

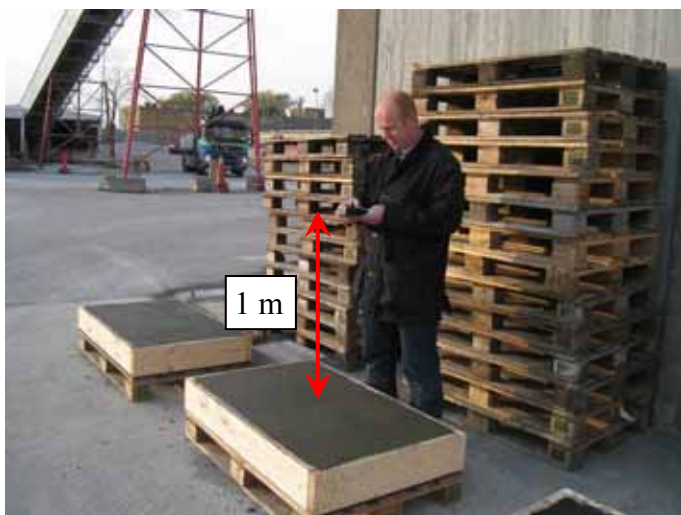
Avläsningarna skedde med handinstrumentet vid sammanlagt fyra tillfällen. De första tre tillfällen var samma dag, ungefär 5, 30 och 180 minuter efter gjutning. Det fjärde tillfället var ca 5 dygn efter gjutningen.

Avläsning efter 5 minuter

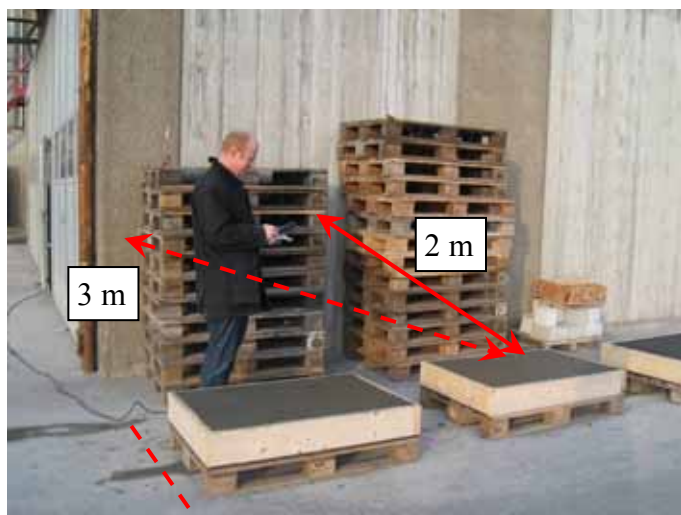
Vid den första avläsningen kontrollerades det främst att alla mätnoderna hade klarat gjutningen. Samtliga mätnoder hittades av handinstrumentet vid sökning på ca 1 meters avstånd, se tabell 2 samt figur 12. Ingen mätnod återfanns på ca 3 meters avstånd, se figur 13.

Tabell 2. Sökresultat efter 5 minuter

Nod nr:	1	2	3	4	5	6	Temp
1 meter	X	X	X	X	X	X	X
3 meter	–	–	–	–	–	–	–



Figur 12. Avläsning på ca 1 meters avstånd



Figur 13. Avläsning på ca 2 meters avstånd

Avläsning 30 minuter

Vid den andra avläsningen kontrollerades de olika nodernas räckvidd. Mätningen skedde vid tre olika avstånd: ungefär 1, 2 samt 3 meter från centrum på gjutformen. Resultatet finns sammanställt i tabell 3.

Tabell 3. Sökresultat efter 30 minuter

Nod nr:	1	2	3	4	5	6	Temp
1 meter	X	X	X	X	X	X	X
2 meter	–	–	–	X	X	X	X
3 meter	–	–	–	–	–	–	–

Avläsning 180 minuter

Vid den tredje avläsningen kontrollerades dels räckvidden samt även signalstyrkan vid två olika räckvidder, se tabell 4 och 5.

Tabell 4. Sökresultat efter 180 minuter

Nod nr:	1	2	3	4	5	6	Temp
1 meter	X	X	X	X	X	X	X
2 meter	X	–	X	X	X	X	X
2,5 meter	–	–	X	–	X	X	–
3,5 meter	–	–	–	–	–	–	–

Tabell 5. Uppmätt fältstyrka efter 180 minuter

Nod nummer:	1	2	3	4	5	6	Temp	Avstånd
Radio RSSI	663A	6002	5F75	6DF6	707D	727F	6224	1 meter
	55FB	5608	5609	5615	561B	5612	55EE	
Noise	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	
RSSI	09E	082	082	0B1	08B	0A2	096	
Radio RSSI	–	–	5B20	5BC8	–	6CD7	–	2,5 meter
	–	–	5610	5610	–	561B	–	
Noise	–	–	0,02	0,01	–	0,04	–	
RSSI	–	–	0,12	0,20	–	0,52	–	

Vid samtliga mätningar visades aldrig de understa två raderna korrekt vid den första RSSI-mätningen, se figur 14. Efter att ha tryckt på ”C” och gjort om RSSI-mätningen visades alltid komplett uppsättning med mätvärden, figur 15.



Figur 14. Icke komplett RSSI-mätning



Figur 15. Komplet RSSI-mätning

Avläsning 5 dygn

Vid den fjärde avläsningen kontrollerades dels räckvidden, signalstyrkan samt loggade temperaturvärdena i förhållande till uppmätta värden med BetongDatorn, se tabell 6, 7 och figur 16.

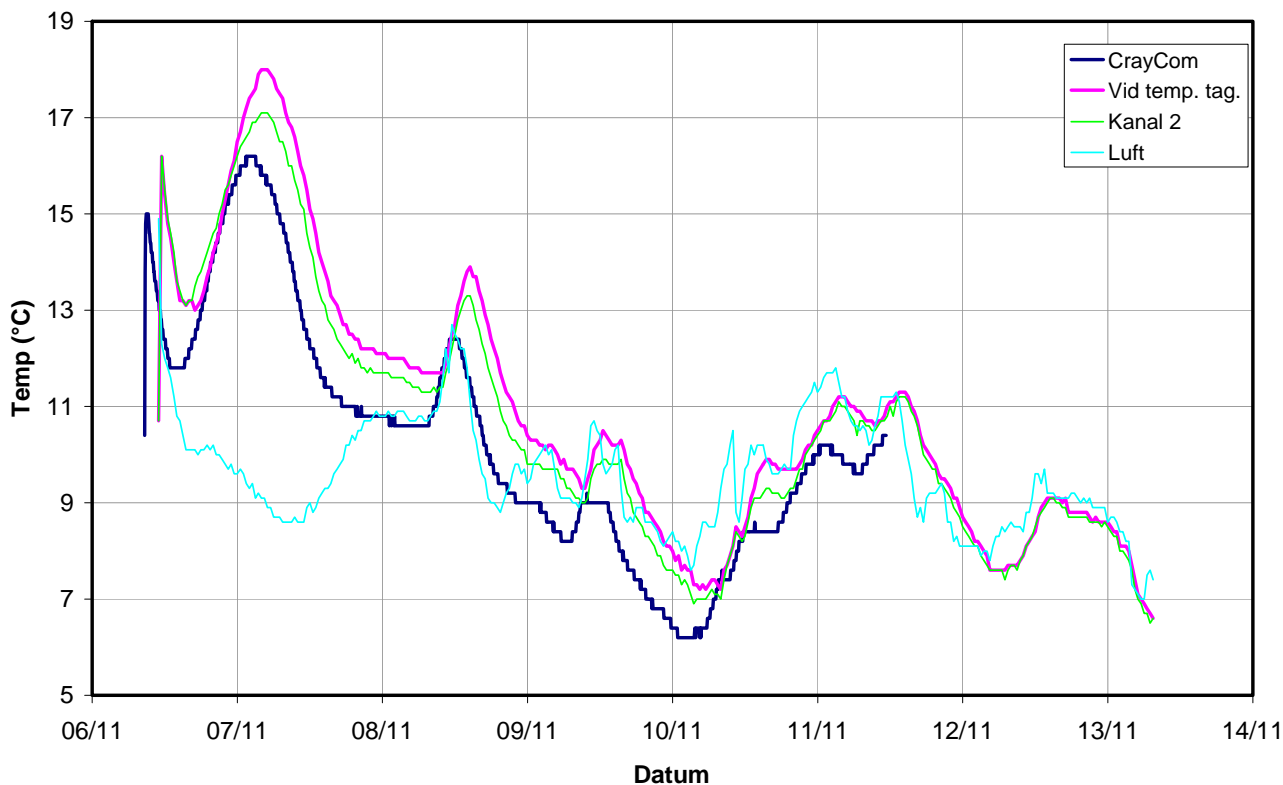
Tabell 6. Sökresultat efter 5 dygn

Nod nr:	1	2	3	4	5	6	Temp
1 meter	X	X	X	X	X	X	X
2 meter	X	–	–	X	–	X	X

Tabell 7. Uppmätt fältstyrka efter 5 dygn

Nod nummer:	1	2	3	4	5	6	Temp	Avstånd
Radio RSSI	6E1A	688A	6372	7041	721F	75FC	5F6B	1 meter
	5600	5620	5620	5610	561C	561A	561B	
Noise	001	002	002	002	003	004	0,01	
RSSI	094	076	07F	0AF	084	09C	0AD	
Radio RSSI	649F	–	–	6208	–	6FB5	8000	2 meter
	562D	–	–	560D	–	5618	5612	
Noise	001	–	–	002	–	007	002	
RSSI	019	–	–	03E	–	041	01B	

Handinstrumentet placerades direkt på betongytan för att få minsta möjliga avstånd för överföringen. Efter ca 15 avbrutna överföringar laddades den kompletta datamängden över. Sannolikt beror de upprepade misslyckandena på att radiosignalen (868 MHz) dämpades ut av betongen.



Figur 16. Loggning av temperatur i betong med CrayCom mätmod för temperatur (tjock blå linje) jämfört med BetongDatorn som hade två mätpunkter i betong samt en i luft, se figur 8.

3.1.4 Observationer

1. Det var enkelt att montera mätnoderna med buntband på armeringen eller genom att spika dem direkt på insidan av formen. Mätnoderna tog ingen synbar skada av denna hantering.
2. Mätnoder var så robust konstruerade och inkapslade att samtliga ”överlevde” den tuffa behandlingen de utsattes för vid gjutning och vibrering av betongen etc.
3. Det upplevdes omständligt och svårt att hantera mätsystemets mjukvara. Trots upprepade instruktioner så krävdes det telefonkontakt för att klara ut problem som uppkom vid både uppstart och avläsningen.
4. Det var enkelt att få kontakt med samtliga mätnoder på kort avstånd. Räckvidden för radiosignalen (868MHz) uppskattades till storleksordningen 1-2 meter för kontakt mellan nod och handinstrument.
5. Överföringen av stora filer med mätdata, från noden till handinstrumentet via radiosignal (868MHz), lyckades bara delvis med denna utrustning, trots upprepade försök.
6. Radiosignalen (868 MHz) verkade ha kortare räckvidd i systemet betong + luft än vad ”Magnetsignalen” (125 kHz) hade.
7. De uppmätta temperaturförloppen följer väl de jämförande mätningarna som gjorts med BetongDatorn på exakt samma mätpunkt.
8. Det fanns en systematisk avvikelse mellan temperaturmätningarna. CrayCom ligger stadigt ca 1°C lägre än BetongDatorn. Detta är inte anmärkningsvärt eftersom systemens osäkerhet är ca $\pm 1^\circ\text{C}$ och de inte har kalibrerats mot varandra inför mätningen.
9. Samtliga värden på radio RSSI för mätnoden för RF avlästes på 1 meters avstånd ökade något i storlek mellan mätningarna vid 180 minuter och 5 dygn.

3.1.5 Kommande arbete

Nästa steg i projektet var att prova utrustningen under fältmässiga förhållanden på byggarbetsplats för att få bättre erfarenheter av dess användarvänlighet under normala byggförhållanden.

I syfte att förbättra räckvidden hos signalen, mellan noderna och avläsningsenheten, beslöts det att en kraftfullare avläsningsenhet med större antenn skulle användas.

I kommande fältmätning avsåg man även att samla ihop signalen med en kvarsittande mottagare med GSM-Modul som automatiskt skickar mätdata för lagring och presentation på en webbaserad server.

3.2 Andra fältstudien

Syfte: Utvärdera system CrayCom med avseende på räckvidd, handhavande samt temperaturnoggrannhet i jämförelse med BetongDatorn.

Utrustning: ID-noder, mätnoder för temperatur samt Najad avläsningsinstrument ansluten till dator. Betongdator för jämförande mätningar.

Utförande: Montera noderna och betongdator i gjutform, gjuta betong med normalt förfarande. Kontrollera räckvidd samt jämföra temperaturmätningar.

3.2.1 Provpplats och gjutform

Mätningen utfördes på en byggarbetsplats för uppförande av enfamiljshus norr om Malmö, 2008-11-27, se figur 17 och 18. Mätnoderna monterades i kantavstyvningen hos grundbetongplattan till en villa.



Figur 17. Villaplattans placering.



Figur 18. Fältkontor invid armerad gjutform.

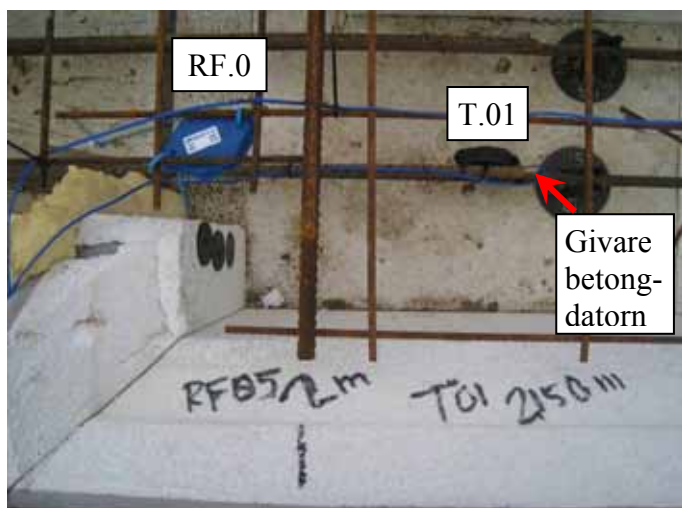
3.2.2 Montering av mätnoder i gjutform

Mätnoderna från CrayCom fästes på armeringsnätet i kantavstyvningen med buntband av plast, se figur 19 och 20. Mätnoden för RF placerades med det ”fuktöppna” hålet för RF-sensorn nedåt. Placering i djup och sidled framgår av tabell 8, samt figur 19-21.

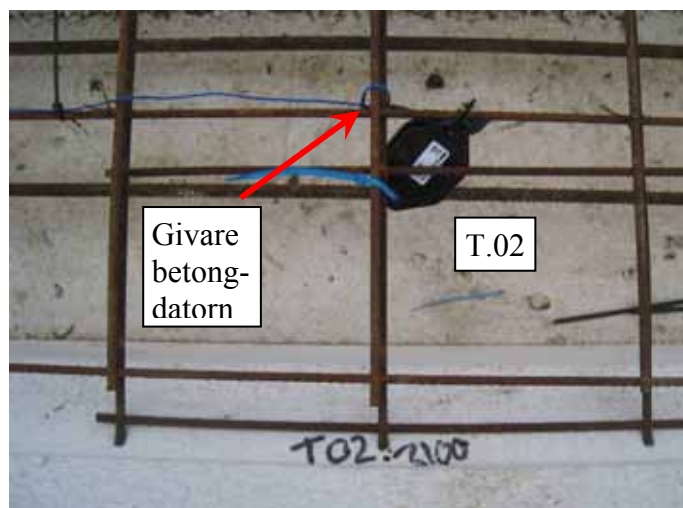
Betongdator för jämförande mätningar placerades invid husgrunden och mätpunkter fästes invid två av noderna, se tabell 8 samt figur 22.

Tabell 8. Placering av noder i kantavstyvningen, djup från färdig betongyta samt avstånd från västra kortväggen, invid vägen.

Djup (mm)	Avst (m)	2,0	2,2	3,1	4,0	6,0	8,0	10,0
50	Övre	RF.05		T.02+BtgD		T.03	ID.02	T.05
250	Undre		T.01+BtgD		RF.04	ID.01	T.04	ID.03



Figur 19. Placering av RF.05, T.01 samt betongdator



Figur 20. Placering av T.02 och betongdator



Figur 21. Kantförstyvning med samtliga noder



Figur 22. BetongDatorns centralenhet invid elcentral

2.2.3 Avläsning av Temperaturer

Momentanvärden från samtliga mätnoden för temperatur har avlästs vid två tillfällen, det första i samband med monteringen samt det andra några dagar efter gjutningen, se tabell 9 och 10.

Tabell 9. Avlästa max och minvärden från CrayCom:s mätnoder, vid montering 2008-11-27

Nod	T.01	T.02	T.03	T.04	T.05
Max	8,4	7,6	7,0	6,8	-50
Min	8,4	7,6	7,0	6,8	769

Tabell 10. Avlästa max och minvärden från CrayCom:s mätnoder, efter gjutning 2008-12-01

Nod	T.01	T.02	T.03	T.04	T.05
Max	24,4	17,8	17,0	23,2	-50
Min	5,8	4,0	3,0	4,0	769

Vid trådlös avläsning med denna utrustning skickas först ett kommando från avläsningsinstrumentet till mätnoden som därefter svarar. Kommandot skickas med en lågfrekvent ”magnetsignal” (125 kHz) medan mätnoden svarar med en ”radiosignal” (868MHz).

Vid momentanavläsning skickas ett kort kommando från avläsningsinstrumentet och mätnoden svarar med att överföra en liten mängd data som visar mätnodens status, max, min och aktuellt mätvärde, figur 23.

The screenshot shows a software window titled "Selected tag status" with the following data:

Tag Search info

Buffer	Unique id	User id	125kHz Rssi/4	Time Stamp	Time Detected	Time Current	Radio Rssi
0001	000934	Temp 01	027	1227777940	60427	60476	28891

Tag Status

Wake up	Restart count	Rssi X	Rssi Y	Rssi Z	Sleep Mode	Tag Type	Battery Level	Tag Type Description
26095	7	107	0	2	00	02	3365	Active Temp Log

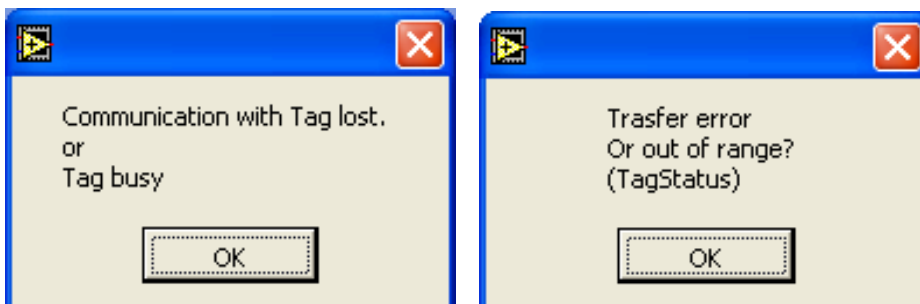
Log Status

Max °C	Min °C	Current °C	Nr logs	Sec/log	Start Time
8,40	8,40	8,40	1	600	2008-11-27 09:31:38

There is a checkbox for "Display Raw log data" which is currently unchecked. At the bottom, there are several control buttons: "Tag Sw version", "Find Tag", "Stop & Save Tag log", "Erase Tag Log", "Write User id", "Erase Reader logs", "Update Tag status", "Restart Tag", and "Exit/Retun".

Figur 23. Momentanavläsning av tempnod 1 i samband med montering 2008-11-27.

Vid överföring av loggade mätdata skickar mätnoden den sparade loggfilen i en mängd små ”paket”. Vid avläsningarna misslyckades denna överföring ofta när det handlade om stora loggfiler och många paket. När ett visst antal paket inte nått mottagaren avbröts överföringen och ett felmeddelande visades, figur 24.



Figur 24. Felmeddelanden som kan visas i samband med att överföringen avbryts.

Genom att koppla till en extern riktantenn som placerades i direkt anslutning till betongen kunde en del av mätvärdena föras över. Överföringen blev i stort sett komplett för mätnoden för temperatur, T3 för RF/temp, RF5 som båda var placerad på djupet närmast ytan.

Överföringen från resterande mättnoder var så fragmatisk att det inte var möjligt att avgöra vad som var mätvärden och vad som var störningar. För att förbättra mottagningen av signalen användes en extern riktantenn som ställdes med spetsen mot betongytan, se figur 25 och 26.

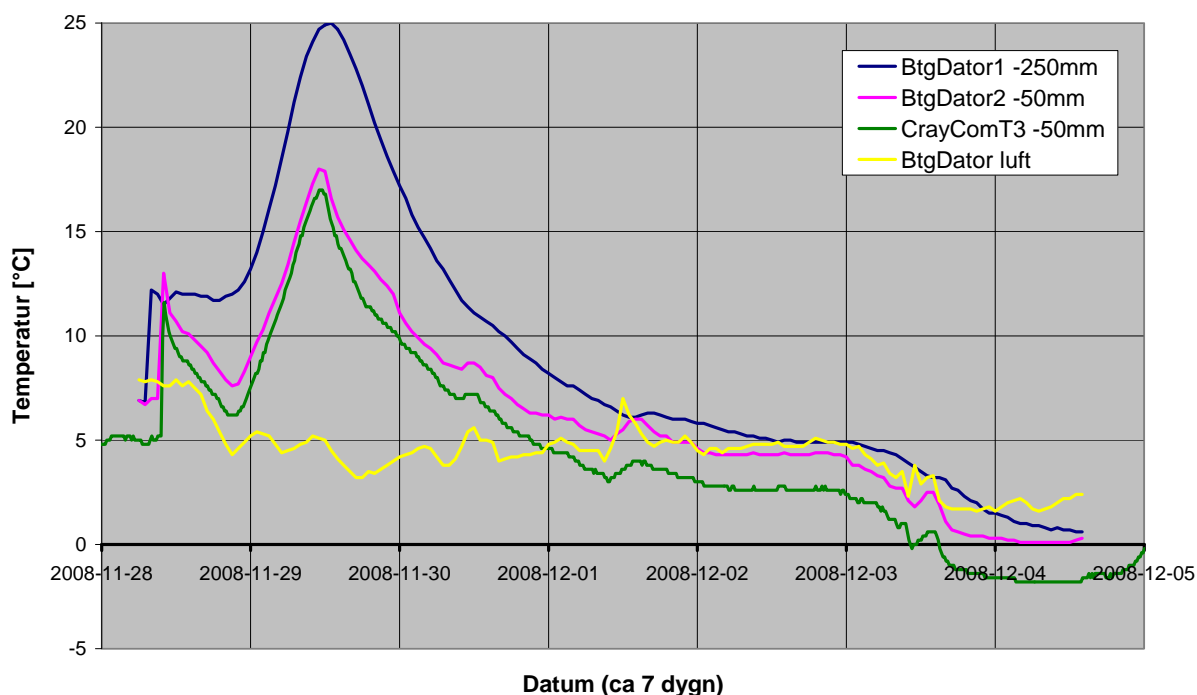


Figur 25. Avläsning 2009-01-23 med riktantenn.



Figur 26. Riktantenn monterat på kamerastativ.

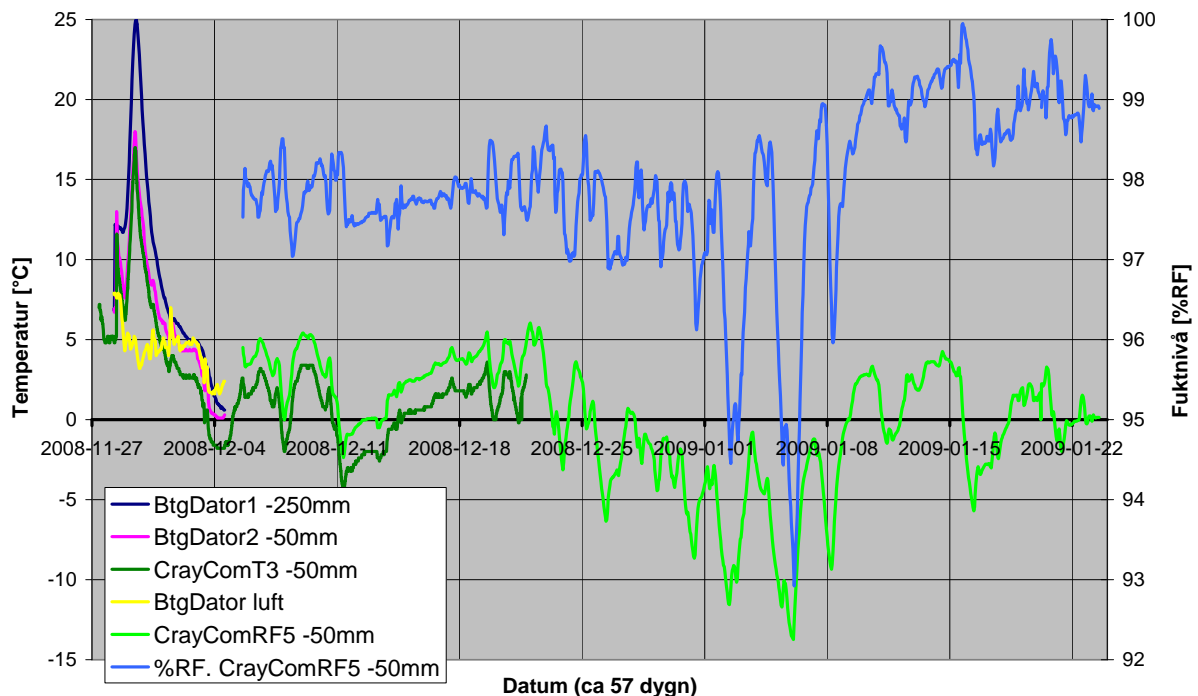
I figur 27 redovisas loggade temperaturer från BetongDatorn med två mätpunkter på olika djup i betongen och en mätpunkt i luften samt från mätnod T3. Observera att ingen av mätpunkterna var på samma plats men att BetongDator 2 och mätnoden för temperatur, T3 var på samma djup, de var monterade på överkantsarmeringen ca 50 mm från ytan.



Figur 27. Loggning av temperatur i betong med BetongDatorn som hade två mätpunkter i betong samt en i luft och CrayCom mätnoden för temperatur T3.

3.2.4 Avläsning av RF

Avläsningar av mätnoden för RF/Temp utfördes på samma sätt som för mätnoden för temperatur. Endast från mätnoden för RF, RF5 kunde sådan mängd data överföras så att det var möjligt att följa ett förlopp, figur 28.



Figur 28. Loggning av temperatur i betong med BetongDatorn som hade två mätpunkter i betong samt en i luft och CrayCom mätnoden för temperatur T3.

3.2.5 Sammanfattning av mätresultaten

Samtliga mätnoder svarade när de anropades. Alla mätnoder kunde lämna ett momentanvärde vid avläsning med det uppstod problem med att överföra större sekvenser med loggade mätdata. De sekvenser av loggade mätdata som kunnat överföras visar på följande:

Precis som i mätningen i betongplattan hos Sydsten så fanns det en systematisk skillnad mellan resultaten från BetongDatorn och mätnoden för temperatur, figur 27. BetongDatorn gav även i dessa försök 1-2 °C högre värde än mätnoden för temperatur från CrayCom. Detta är inte anmärkningsvärt eftersom systemens osäkerhet är ca $\pm 1^\circ\text{C}$ och de inte har kalibrerats mot varandra inför mätningen.

Mätnoden för RF/Temperatur, RF5 visade en något högre temperatur än mätnoden för temperatur, T3 i figur 28 Sannolikt kan nivån för temperaturvärdena vara lika för BetongDatorn som för mätnod RF5. Det återstår dock att klargöra vad som skiljer mellan mätnoderna T3 och RF5.

Förloppen hos resultaten från de båda typerna av utrustningarna följde varandra väl. Man kan tydligt se värmeutvecklingen i betongen, som har en topp under 2008-11-29, på samtliga djup. De uppmätta temperaturerna i betongen svarade på förändringar i uteluftens uppmätta temperatur på ett rimligt sätt.

3.2.6 Observationer och erfarenheter

Det var enkelt och praktiskt att montera mätnoderna med hjälp av buntband på armeringsjärnen. Det upplevdes aldrig som man var tvungen att kompromissa med placeringen av noderna, utan det var alltid möjligt att fästa dem där man ville.

Samtliga mätnader fungerade efter gjutningen även i denna fältmätning. Man kan därför dra slutsatsen att kapslingen var av sådan art att den skyddar nodernas elektronik mot den mekaniska påfrestningen som uppkommer i samband med gjutning och vibrering av betongen samt mot betongens aggressiva miljö, åtminstone under den tid som dessa mätningar utfördes.

Vid anrop och avläsning har det aldrig upplevts vara problem att kontakta de noder som fanns inom några meters radie. Däremot upplevdes överföringen av mätdata från noderna mycket osäker, speciellt vid stora datamängder. Naturligtvis var det svårt att med bestämdhet avgöra vilken av signalerna som inte fungerade vid momentanavläsningar på långt håll eftersom den enda respons man kan avläsa från noderna var deras signal. Dock kan man med stöd av signalteorin, se kapitel 1, säga att det i denna tillämpning är rimligt att "magnetsignalen" (125 kHz) till mätnoderna har längre räckvidd än radiosignalen (868 MHz) från mätnoderna.

Räckvidden för radiosignalen (868MHz) var i storleksordningen 6-8 meter för kontakt. Vid denna räckvidd gick det att få respons från mätnoden i form av dess ID-nummer. Det var dock problematiskt att ens göra momentanavläsningar vid denna räckvidd. Avläsning av momentanvärde samt max- och minvärde kunde oftast göras utan problem på några meters avstånd. Överföring av loggade mätdata kunde inte ens göras på detta korta avstånd.

Det enskilt största problemet som det lades mest resurser på under denna fältmätning var att föra över data från mätnoderna. Med hjälp av extraordinära insatser i form av en riktantenn i direkt kontakt med betongen kunde en del av mätdata från två mätnader, på 50 mm djup, föras över. Överföringen från de andra mätnoderna var så fragmenterad att det inte gick att urskilja vad som var mätvärden och vad som var störningar. Det går därför med största visshet att konstatera att överföringen av datafiler från mätnoden till Najad via radiosignal (868MHz) inte var tillfredställande.

De mätvärden som kunnat överföras bedöms vara rimliga och riktiga. Förloppen hos de avlästa temperaturvärdena följer väl referensvärdena uppmätta med BetongDatorn. Det återstår dock att utreda varför mätnoderna för temperatur verkar visa en något lägre temperatur än BetongDatorn. Detta fenomen verkar inte uppkomma med mätnoderna för RF/temp vilket kan tyda på att avvilkelsen ligger hos utformningen av mätnoden för temperatur. Kalibrering av utrustningen från CrayCom har inte utförts. Absolutvärdena kan därför vara felaktiga, speciellt för RF-mätningar som normalt kräver omsorgsfull kalibrering.

3.2.7 Kommande arbete

Nästa steg i projektet var att utveckla en utrustning som kommunicerade med magnetsignal (125 kHz) i båda riktningarna för att få bättre räckvidd genom den armerade betongen.

Samt att införa ett system för beslutstöd. I praktiken skulle detta innebära att mätdata lagrades och behandlades av en server. Därefter presenterades resultatet på en webbsida i sådan form att ett efterfrågat mervärde hade adderats till de uppmätta värdena.

3.3 Tredje fältstudien

Syfte: Utvärdera CrayComs system med magnetsensorer med avseende på räckvidd i betong, handhavande samt temperaturnoggrannhet i jämförelse med BetongDatorn.

Utrustning: Mätnader för temperatur samt batterianslutet avläsningsinstrument med kabelöverföring till dator. Betongdator för jämförande mätningar.

Utförande: Montera mätnoderna och betongdator i gjutform hos Sydsten, gjuta betong. Kontrollera räckvidd genom betongen samt jämföra temperaturmätningar.

3.3.1 Provplats och gjutform

Gjutformen var av storleken 1 m³. I botten av gjutformen var ett armeringsnät placerat på ca 3 cm höjd. Genomgående armeringsstänger fanns monterade på två nivåer för att ta upp formtrycket.

Gjutningen ägde rum hos Sydsten i Malmö, 2009-05-20, se figur 29 och 30.



Figur 29. Gjutformens placering.



Figur 30. Fältkontor invid armerad gjutform.

3.3.2 Montering av mätnader och gjutning

Den ena av mätnoderna från CrayCom monterades på ovansidan av armeringsnätet, ca 5 cm från botten och ca 10 cm från sidan av formen, se figur 31. Den andra mätnoden från CrayCom monterades på undersidan av det understa krysset av armeringsjärn, ca 10 cm från botten och 20 – 30 cm från sidan av formen. Buntband av plast användes för samtliga monteringar.

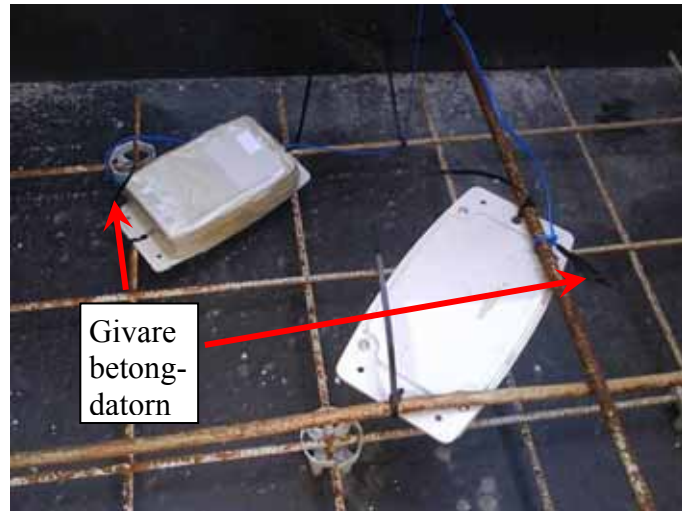
Avläsningsenheten till CrayCom placerades på utsidan av gjutformen, placering 1 enligt figur 34, med 20-30 cm betong till mätnoden. Innan mätningen avslutades flyttades avläsningsenheten till placering 2 under några timmar, med ca 50-70 cm betong till mätnoden.

Betongdator för jämförande mätningar placerades invid gjutformen och mätpunkterna fästes invid mätnoderna samt i uteluften, se figur 32.

Gjutning med självkompakterande betong skedde direkt från roterbil, se figur 33.



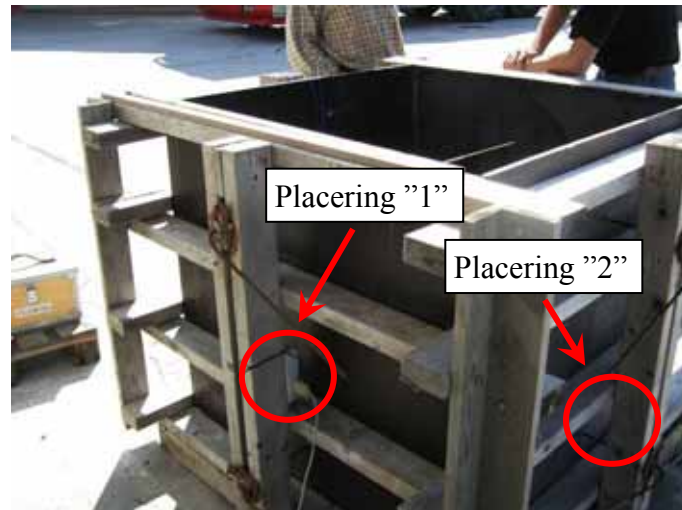
Figur 31. Placering av CrayCom på armeringsjärn.



Figur 32. Placering av BetongDatorns mätmoder.



Figur 33. Ingjutning av mätutrustningen.



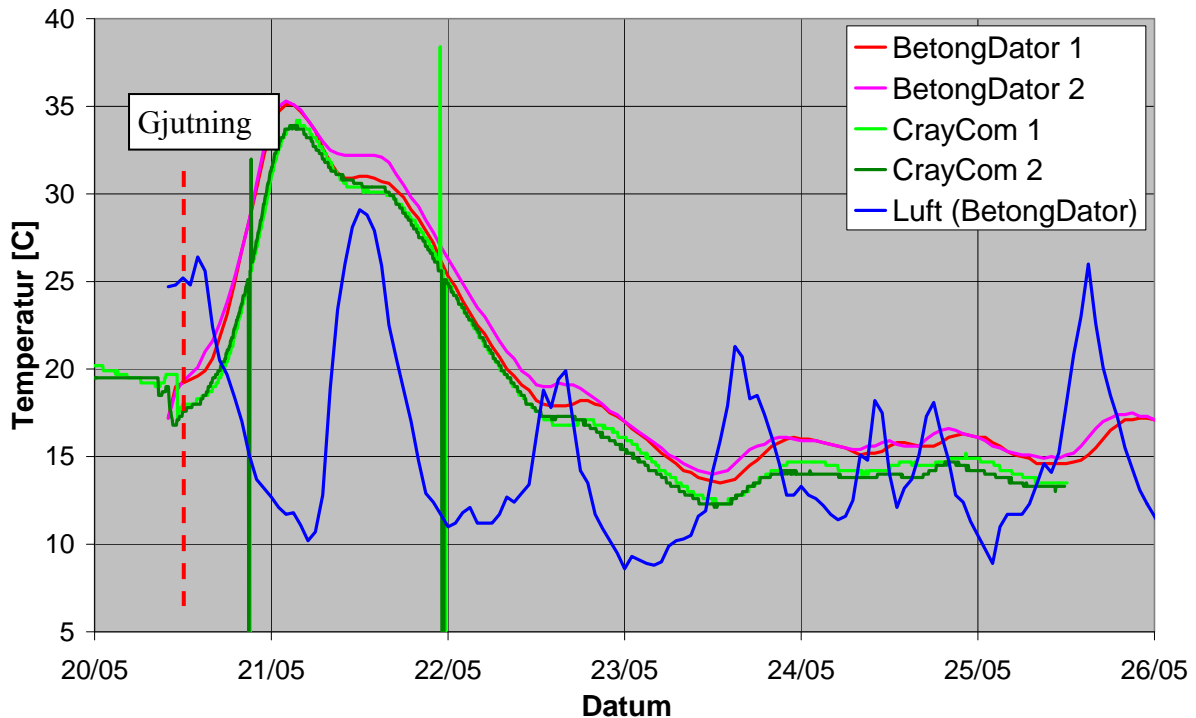
Figur 34. Mottagarens två placeringar.

3.3.3 Avläsning av Temperaturer

Överföring av mätvärden från CrayCom skedde ca 5 dygn efter gjutning, BetongDatorn loggade temperaturer i ytterligare något dygn innan den avslutades, se figur 35.

Avläsningsenheten för CrayCom var batteridrivna och kommunicerar trådlöst med mätnoderna via lågfrekvent ”magnetsignal” (125 kHz). Mätvärdena skickades från mätnoderna med 5 minuters mellanrum till avläsningsenheten som sparade dem i sitt minne. Vid överföring av mätvärdena från CrayCom kopplades en kabel mellan avläsningsenheten och en bärbar dator. Mätvärdena överfördes med en speciell mjukvara till datorns hårddisk och mätningen avslutades därefter.

Mätresultaten visade god överensstämmelse mellan temperaturförloppen som registreras av CrayCom och BetongDatorn. Precis som i de tidigare mätningarna visade BetongDatorn ett något högre mätvärde än CrayCom, skillnaden var även i denna mätning i storleksordningen omkring 2 °C.



Figur 35. Loggning av temperatur i betong med BetongDatorn som har två mätpunkter i betong samt en i luft och CrayComs två mätpunkter.

Överföringen av mätdata gick problemfritt med undantag för lite krångel med den externa utrustningen som behövdes för att koppla mätutrustningens kabel för COM-port till datorns USB-port. Alltså en typ av adapter som krävdes då datorn inte var utrustad med COM-port.

3.3.4 Observationer och erfarenheter

Det var enkelt och praktiskt att montera även denna något större modell av mätnoder med hjälp av buntband på armeringsjärnen.

Samtliga mätnoder fungerade efter gjutningen även i denna fältmätning. Därav kan man dra slutsatsen att även denna typ av mätnoder/kapsling av mätnoder var av sådan art att den skyddar mätnodernas elektronik mot betongens aggressiva miljö och den mekaniska påfrestningen som uppkommer i samband med gjutning av betongen.

Även med detta mätsystem upplevdes det omständligt och svårt att hantera mjukvara. Även fast hårdvaran skiljde sig från tidigare fältmätningar så var mjukvaran ungefär likadan som tidigare. Trots upprepade instruktioner från utvecklaren av systemet så krävdes det återigen telefonkontakt för att klara ut problem som uppkom vid både uppstart och avläsningen.

Mätvärdena från CrayCom upplevdes som rimliga, riktiga och relativt stabila. Endast 13 st av mätvärden avvek från det förväntade. CrayCom 1 har vid två tillfällen (totalt 5 mätvärden) visat värdet "0" och vid ett tillfälle visat ett enstaka mätvärde som var mer än 10°C för högt. CrayCom 2 har vid ungefär samma tidpunkter avvikit på liknande sätt. Denna typ av avvikelser bör i framtiden undvikas eller sorteras bort för att inte ge ett felaktigt resultat då ekvivalent mognadsålder skall beräknas.

Det upplevdes som en markant förbättring att mätnoderna kontinuerligt skickade värdena som i denna fältmätning lagrades avläsningsenheten. Avläsningen gick därmed betydligt snabbare och smidigare eftersom mätvärdena redan fanns lagrade i avläsningsenheten som direkt kunde anslutas till en bärbar dator med en sladd. Med detta system löstes de tidigare problemen med långa och krångliga förfaranden med överföring av mätdata från noderna. Tidigare mätningar med radiosignal (868MHz) uppvisade att de största bristerna i överföringen uppkommer då stora datamängder skickades i en följd.

Räckvidden för magnetsignalen (125 MHz) visade sig vara mer än 50 cm genom armerad betong. Detta var tillräckligt för att skicka mätvärden till avläsningsenheten i denna fältmätning.

Kalibrering av utrustningen från CrayCom har inte heller denna gång utförts, absolutvärdena kan därför vara något felaktiga men de uppmätta förloppen var rimliga och sannolikt även riktiga.

3.3.5 Kommande arbete

Nästa steg i projektet var att ta fram en utrustning som kommunicerade med magnetsignal (125 kHz) samt med inbyggd GSM-modul i avläsningsenheten. Avläsningsenheten samlar in data från närliggande mätnader och skickar dem till en server som kopplas till Internet.

Samt att demonstrera ett system för beslutsstöd på servern som i första steget innefattar att mätvärdena presenteras som en temperaturgraf samt dessutom kontinuerligt omvandlas till en graf för ekvivalent mognadsålder.

3.4 Fjärde fältstudien

Syfte: Utvärdera CrayComs system med magnetsensorer med avseende på räckvidd i betong, handhavande samt temperaturnoggrannhet i jämförelse med BetongDatorn.

Urustning: Mät-noder för temperatur samt batterianslutet avläsningsinstrument med GSM-överföring till Internetansluten server. Betongdator för jämförande mätningar.

Utförande: Montera noderna och betongdator i gjutetapp hos Sydsten, gjuta betong. Kontrollera räckvidd genom betongen samt jämföra temperaturmätningar.

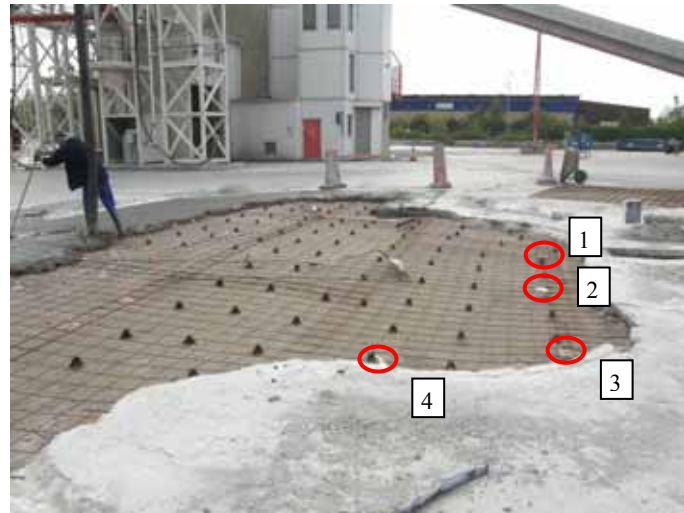
3.4.1 Provplats och gjutform

Provplatsen var en fyllnadsgjutning på gårdsplanen hos Sydsten i Malmö. Storleken var ca 100 m² och 20 cm tjock i medeltal, alltså totalt ca 20 m³ betong. Gjutningen utfördes direkt på bärlager av grus utan fuktspärr, värmeisolering eller annat avgränsande materialskikt. Höjden varierade från ca 10 cm upp till ca 40 cm. Gjutningen avgränsades i sidled av gårdsplanens ursprungliga betongbeläggning, se figur 36 och 37.

Gjutningen ägde rum hos Sydsten i Malmö, 2009-09-07.



Figur 36. Gjutningens placering.



Figur 37. Mätnodernas placering i gjutningen.

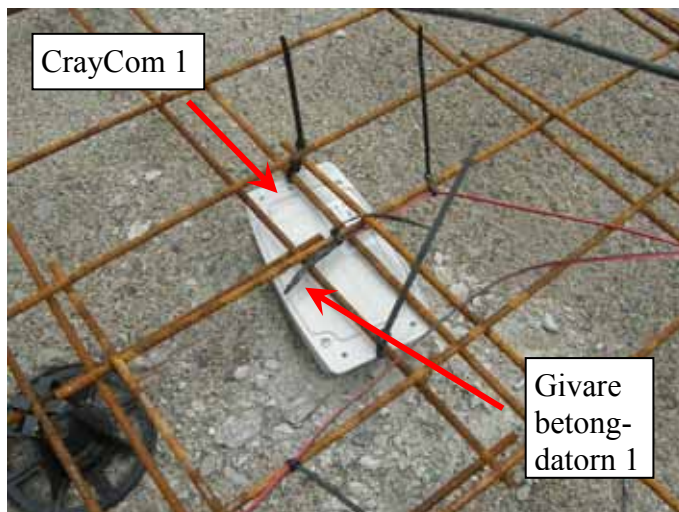
3.4.2 Montering av mätnoder och gjutning

Samtliga mätnoder från CrayCom monterades på undersidan av armeringsnätet, någon enstaka cm från bärlagret av grus. Buntband av plast användes för samtliga monteringar. På grund av variationer hos höjden av bärlagret och den ursprungliga betongen så varierade betongtjockleken och därmed täckskiktet för de fyra mätplatserna. Vid mätplats 1 och 2 var gjutningen tunnast, ca 15 cm, vid mätpunkt 3 tjockast, ca 35 cm, och vid mätpunkt 4 ca 25 cm.

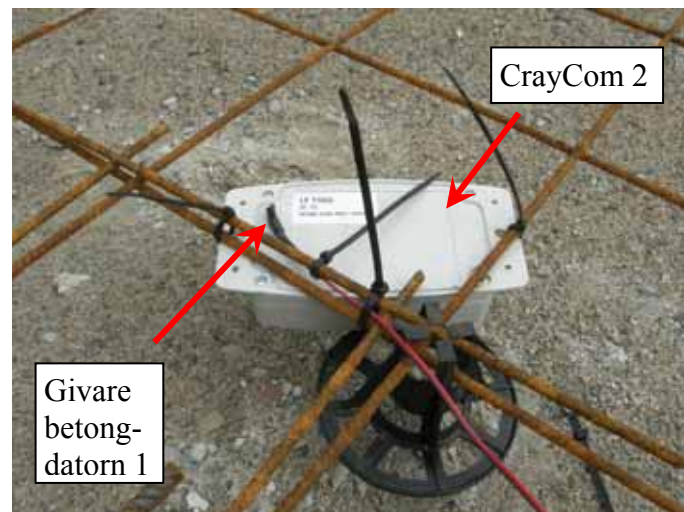
Buntband fästes på armeringsnätet invid mätnoderna som antenner för identifiering av mätplatserna. Efter gjutning stack endast buntbandet vid mätnoder/mätplats 1 upp genom betongytan. De övriga buntbanden hade antingen böjts och fastnat i betongen eller vridits runt infästningen där de dragits åt kring armeringsjärnet.

Betongdator för jämförande mätningar placerades invid gjutformen och mätpunkterna fästes invid mätnoderna 1 och 2 samt i uteluften, se figur 38 och 39. Mätnod 3 och 4 fästes på distanser under armeringsnätet med kontakt mot marken, se figur 40 och 41.

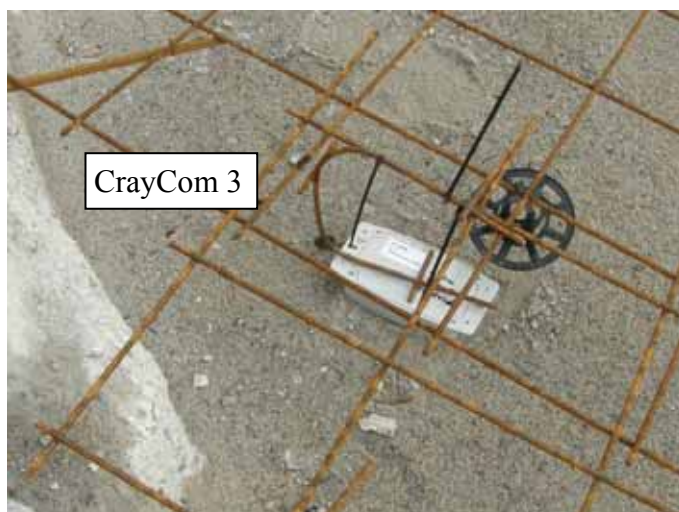
Gjutning skedde med pumpbil med snabel, se figur 36.



Figur 38. Placering av CrayCom 1 och Btgdator 1.



Figur 39. Placering av CrayCom 2 och Btgdator 2.



Figur 40. Placering av CrayCom 3 mot marken.



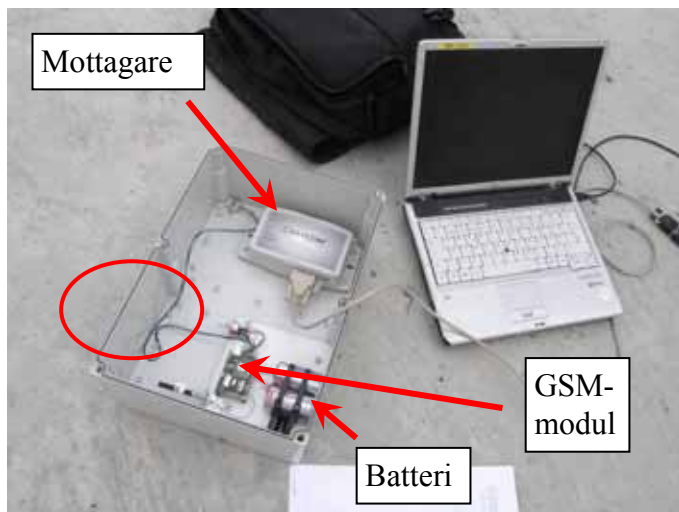
Figur 41. Placering av CrayCom 4 under "tassen"..

3.4.3 Placering av avläsningsenhet

Avläsningsenheten bestod av en mottagardel, en GSM-modul samt batterier. Mottagardelen kunde antingen kopplas till en dator för direkt avläsning av mätvärden eller till den inbyggda GSM-modulen för överföring, lagring och visning på en Internetansluten server.

Flera olika placeringar av avläsningsenheten provades innan den optimala placeringen hittades, se figur 42 - 51. Tre grundläggande parametrar syntes viktiga för att få bra mottagningsförhållanden:

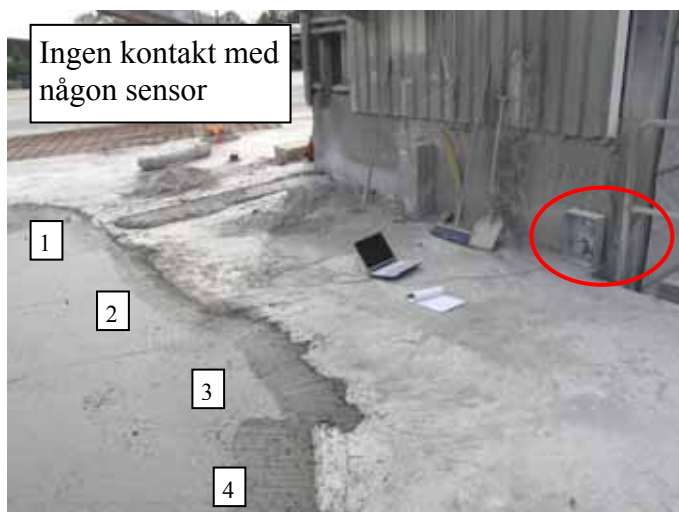
1. Avståndet från mätnoden var avgörande för att signalstyrkan skulle vara tillräckligt stark, signalstyrkan avtar sannolikt med (kubiken av) avståndet.
2. Höjden som avläsningsenheten placeras på antogs vara viktig eftersom mätnoderna gjuts in under golvytan och en lågt placerad mottagare medför att signalen måste "snedda" en lång sträcka genom betongen.
3. Orienteringen, eftersom magnetfältet som alstras i en spole i instrumentet inte var symmetrisk utan snarare har formen av en "donut", se figur 3, så antogs det även finnas en "optimal" orientering.



Figur 42. Avläsningsenhet med mottagare och GSM-modul kopplad direkt till dator för direktavläsning.



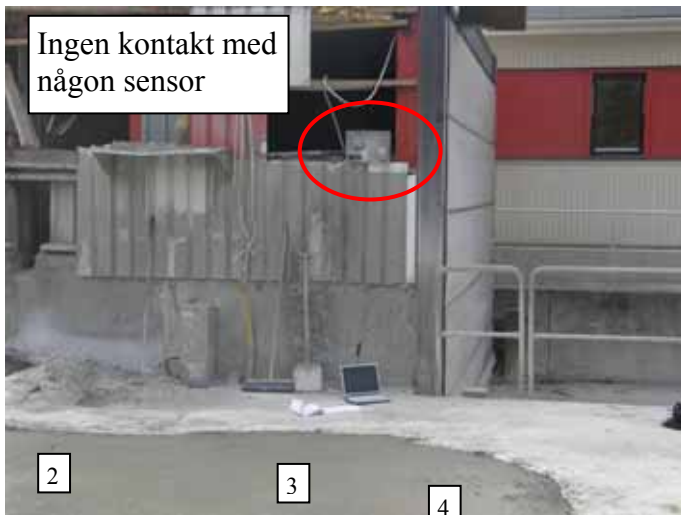
Figur 43. Avstånd 0,5 - 3 m, höjd 0 m.



Figur 44. Avstånd 3 - 4 m, höjd 0,3 m.



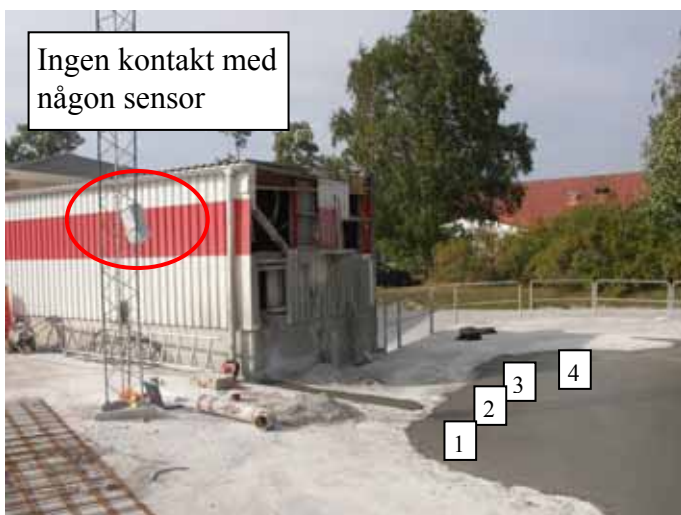
Figur 45. Avstånd 3 - 4 m, höjd 0,3 m.



Figur 46. Avstånd 3 – 4 m, höjd 0,3 m.



Figur 47. Avstånd 3 – 6 m, höjd 1 m.



Figur 48. Avstånd 3 – 6 m, höjd 2 m.



Figur 49. Avstånd 0,5 – 3 m, höjd 1 m.



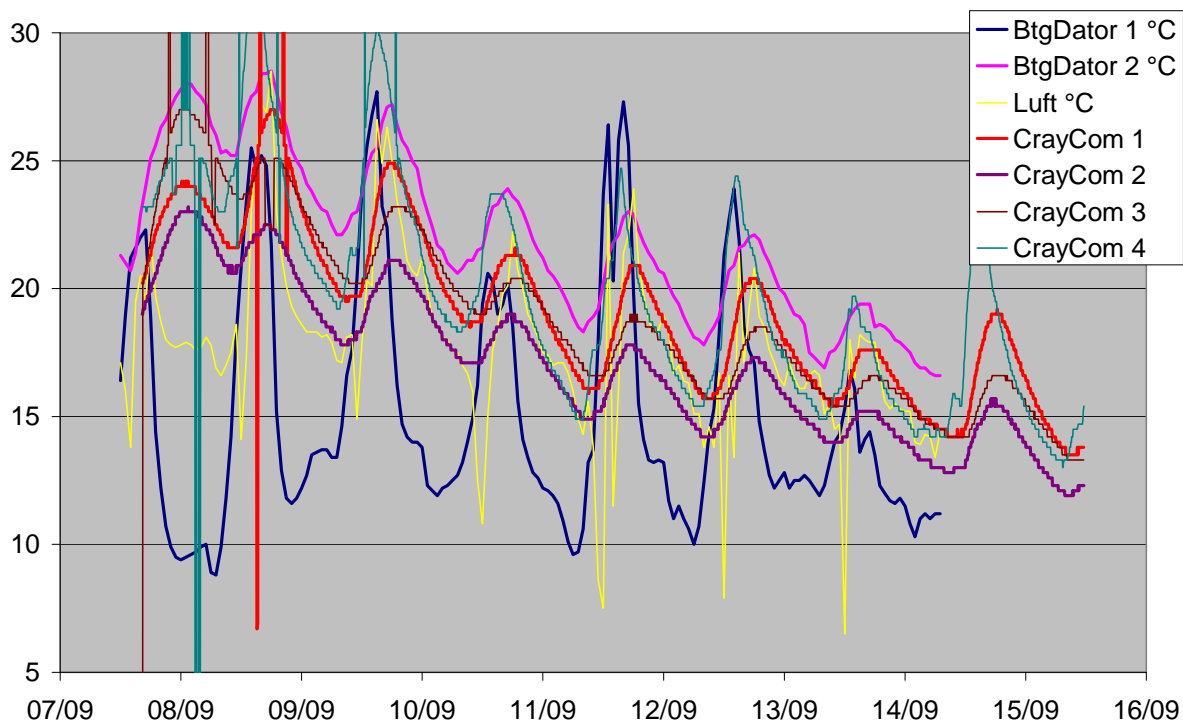
Figur 50. Avstånd 0,5 – 3 m, höjd 0,5 m.



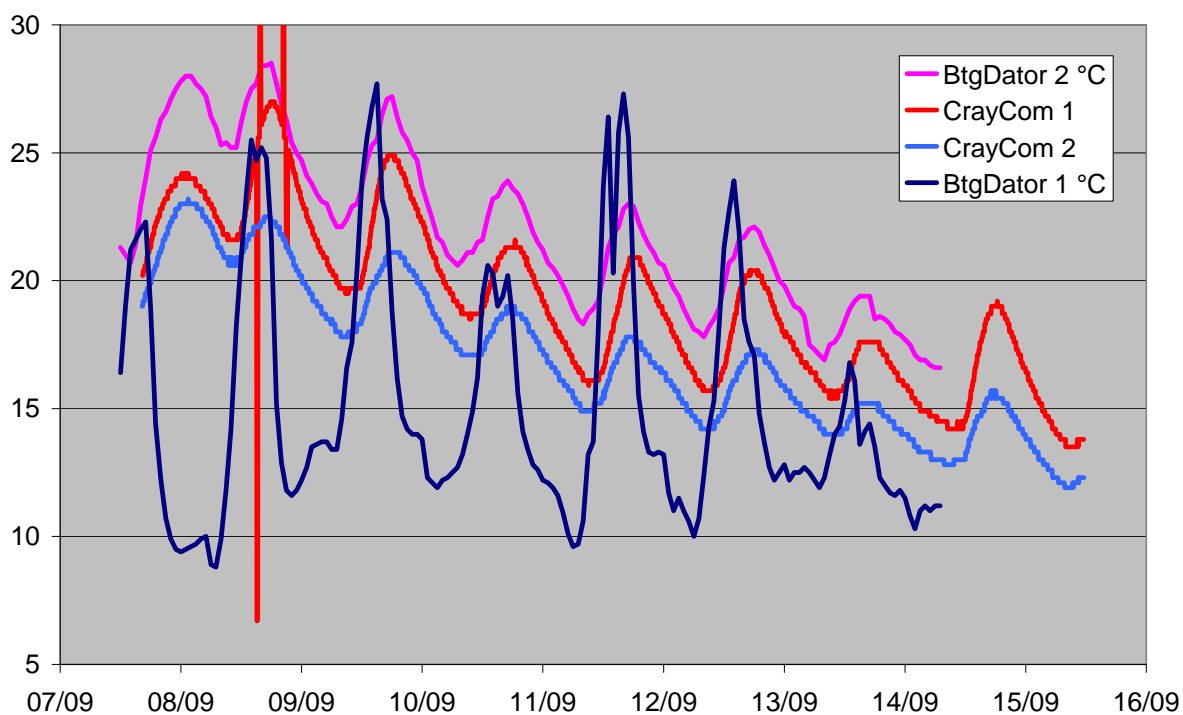
Figur 51. Avstånd 0,5 – 3 m, höjd 0,5 m.

3.4.4 Avläsning av Temperaturer

I nedanstående figurer 52 och 53 visas samtliga mätdata från mätningar med både CrayCom och BetongDatorn under ca 8 dygn.

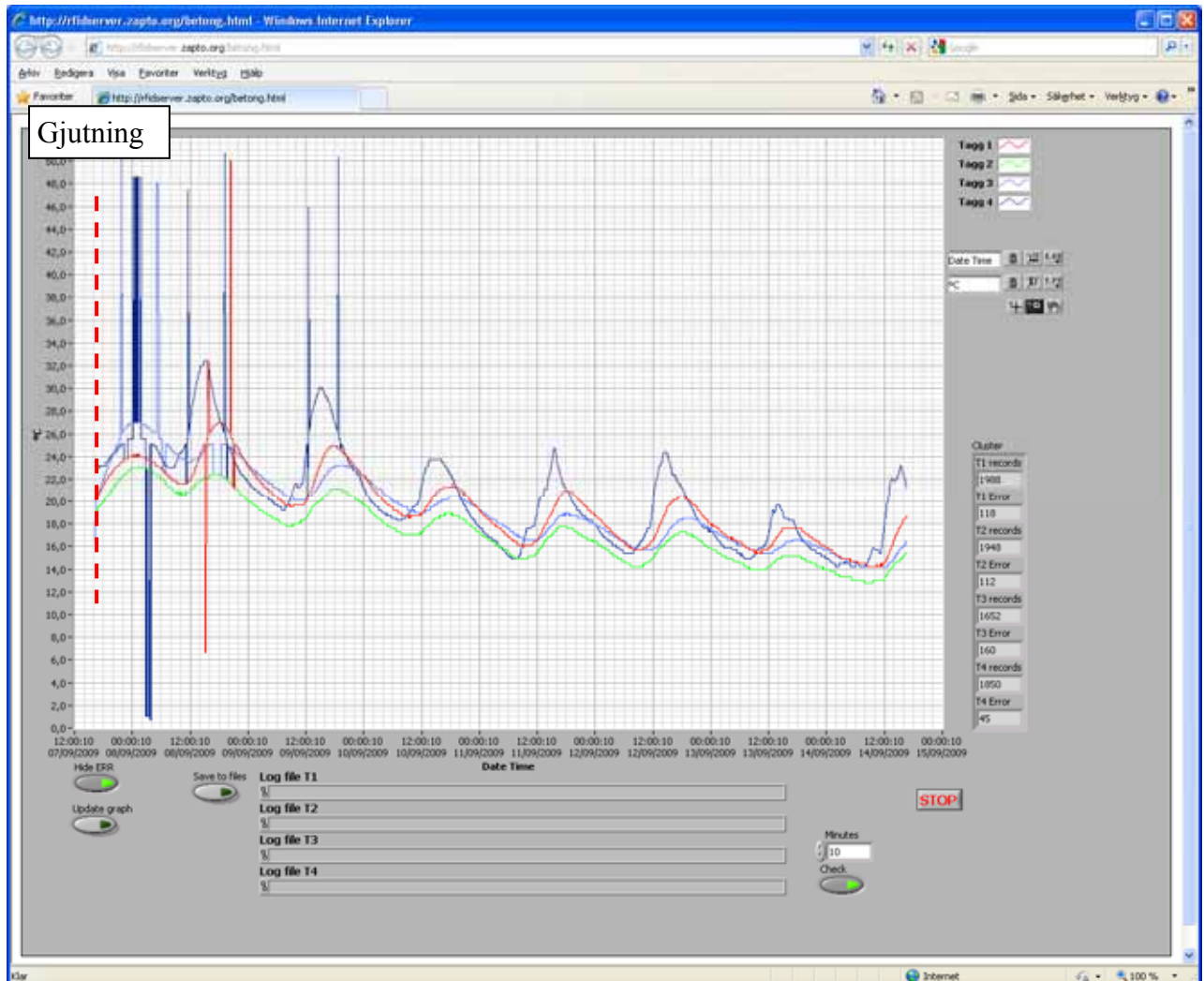


Figur 52. Samtliga mätvärden från BetongDatorn och CrayCom.



Figur 53. Jämförande mätvärden från BetongDatorn och CrayCom.

Avläsningsenheten för CrayCom var batteridrivnen och kommunicerar trådlöst med mätnoderna via lågfrekvent ”magnetsignal” (125 kHz). Mätvärdena skickas från mätnoderna med 5 minuters mellanrum till avläsningsenheten som sparade dem i sitt minne. Avläsningsenheten skickade sedan dem via GSM-anslutning till en Internetansluten server i som presenterar de uppmätta värdena i en graf, se figur 54.



Figur 54. Presentation av mätresultat på webbsida från loggning av temperatur i betong med CrayCom.

3.4.5 Observationer

1. Återigen var det lätt att fästa mätnoderna vid armeringsnätet.
2. Samtliga mätnoder överlevde vibrering mm vid betonggjutningen.
3. Svårhanterlig mjukvara, krävde återigen mycket hjälp via telefon.
4. Den effektiva räckvidden för ”Magnetsignalen” (125 kHz) var i intervallet 1 – 3 m.
5. Avläsarenhetens placering och orientering var avgörande för systemets funktion.
6. Överföring via GSM-signal och presentation på webbplats fungerade utan missöden.

4. Diskussion och slutsatser

4.1 Signalöverföringens räckvidd

Nedanstående ungefärlig räckvidd av signalen har uppmätts i respektive fältstudie:

Radiosignal (868 MHz)

Fältstudie 1: Avläsning enstaka värden på 1-2 meter avstånd från armerad betong.

Fältstudie 2: Avläsning långa mätserier < 0,5 meter avstånd från armerad betong.

Magnetsignal (125 kHz)

Fältstudie 3: Avläsning enstaka värden genom $\geq 0,7$ m glest armerad betong.

Fältstudie 4: Avläsning enstaka värden på 1-3 meter avstånd från armerad betong.

Under försöken krävdes långa supportsamtal och stor omfattning av manuellt handhavande av utrustningen vid uppstart och avläsning. Erfarenheten blev att utrustningen måste utvecklas mot att vara så enkel och användarvänligt utformad att den i princip kan kopplas upp av platschefen eller annan ordinarie personal på en byggarbetsplats. Helst skall man aldrig behöva gå in i utrustningens mjukvara på arbetsplatsen.

Det har många gånger varit svårt att hitta den optimala placeringen för avläsningseenheten, om det ens funnits någon. Erfarenheten blev att placering av komponenterna och inbördes avstånd och orientering inte får vara så känslig att det behövs signalspårning för att utrustningen skall fungera. Signalen mellan mätnoderna och avläsningseenheten behöver minst ha en räckvidd på ca 5 meter utanför betongen för att vara praktisk användbar i fält. Avläsningseenheten bör helst vara beroende av orientering så att den kan monteras på det sätt som är lämpligast på grund av arbetsplatsens utseende.

De första försöken utfördes med en utrustning där avläsningseenheten skickade ut en signal till mätnoderna varje gång en avläsning skulle ske. Erfarenheten blev att det inte är nödvändigt att skicka en signal inför varje avläsning, det är sannolikt fullt tillräckligt att mätnoderna har en inbyggd timer och signaler enbart skickas i en riktning, från mätnoderna och in till mottagaren för vidare överföring via GSM till en server för lagring och visning på webbplats.

I fältstudie 1 kunde man se en tendens till att signalstyrkan ökade med tiden de första dagarna. Erfarenheten blev att gammal betong kanske kan ha egenskaper som skiljer sig från nygjuten betong. Detta fenomen kunde dock inte bekräftas i fältstudie fyra där räckvidden var ungefär densamma vid avläsningen efter tio dygn som för den nygjutna betongen. Dock visar mätresultaten i figur 54 flertalet avbrott i överföringen under de första dygnet. Eftersom avbrotten i överföringen upphör efter ett par dygn kan detta indirekt visa på att nygjuten betong försvårar signalöverföringen den första tiden.

I de första två fältstudierna fick man problem med överföring av stora datafiler. Motsvarande problem uppkom inte vid överföring av små datafiler i fältförsök 3 och 4. Erfarenheten blev att det är lämpligast att kontinuerligt skicka de uppmätta värdena i små serier med enstaka mätvärden från mätnoderna till server för att undvika de överföringsproblem som kan uppkomma vid stora datamängder.

Enstaka mätvärden som skickats från mätnoderna har ibland inte kommit fram till avläsningseenheten, detta har dock inte stört utvärderingen av mätningen i någon betydande omfattning. Erfarenheten blev att enstaka borttappade mätvärden sannolikt inte är något stort problem i denna tillämpning. Om minst 90 % av mätvärdena från varje mätnod kommer fram

kan borttappade mätvärden sannolikt återskapas vid behov med tillräcklig noggrannhet genom interpolation.

4.2 Avläsningseenhet

I fältförsöken har olika typer av avläsningseenheter använts för att läsa av signalen från mätnoderna. I det första försöket användes en handhållen avläsningseenhet och i det andra försöket en något större avläsningseenhet som kopplades med kabel till både strömförsörjning och styrning från en dator. Överföring av stora filer vållade stora problem och var tidsödande eftersom överföringshastigheten upplevdes mycket låg. Erfarenheten blev att överföringen av data från mätnoderna till avläsningseenheten helst skall ske automatiskt, det var mycket tidsödande att göra det manuellt vid avläsningstillfället.

I de avslutande två fältförsöken användes avläsningseenheter som lämnades vid mätplatsen. I fältförsök tre anslöts en dator till avläsningseenheten innan mätningen för att starta upp den och ställa in de erforderliga parametrar, även hos mätnoderna. Avläsningseenheten kopplades åter till datorn med kabel vid mätningens slut för att föra över mätvärdena samt stänga av avläsningseenheten. I fältförsök fyra hade avläsningseenheten utrustats med en GSM-modul vilket innebar att överföringen av mätdata skedde automatiskt och kontinuerligt till en Internetansluten server i Kalix. Dock behövde dator kopplas till avläsningseenheten med kabel för uppstart, inställning av parametrar och avslut av mätningen. Erfarenheten blev att överföring via GSM-modulen fungerade mycket bra men att avläsningseenheten behöver utvecklas så att uppstart och nödvändiga inställningar kan ske utan att man behöver koppla till en extern dator.

Användarvänligheten var överlag mycket låg hos de system som användes under fältförsöken. Det krävdes i stort sett kontinuerlig telefonkontakt med en kunnig tekniker för att starta upp och hantera mätsystemet. Vid bister väderlek var det mycket påfrestande att hantera en trilsande utrustning med hjälp av instruktioner via en mobiltelefon som tidvis hade dålig täckning. Erfarenheten blev att avläsningseenheten inte skall behöva öppnas eller på annat sätt anslutas till specialinstrument för att sättas igång. Önskvärt vore en ”nyckel” eller knapptryckning för uppstart och att avläsningseenheten är utrustad med lysdioder eller motsvarande som indikerar vilka mätnoder den har kontakt med.

Erfarenheter från fältförsöken har också visat på att det är en stor fördel om samtliga delar av utrustningen på arbetsplatsen är batteridriven, vädertålig och kan fästas ordentligt på olika sätt. Exempelvis med hänglås, kraftiga buntband, silvertejp eller till och med spikpistol.

Sannolikt kan avläsningseenheten utan problem få vara stor som en portfölj. Det är dock önskvärt att den är mindre om funktionen och räckvidden är tillräcklig. Räckvidden hos utrustningen är sannolikt mycket viktigare än komponenternas storlek.

4.3 Mätnoder

I samtliga fältförsök har mätnoderna fästs på armeringsjärn i betongen med buntband. I några försök har mätnoder även skruvats fast i träformen. Detta fungerade mycket bra så erfarenheten blev att mätnoderna bör utformas så att fästning med buntband underlättas. Förslagsvis kan mätnodernas hölje utrustas med ett eller flera hål där buntbandet kan träs igenom, samt att hålen är även kan fungera som skruvhål vid behov.

I några av fältförsöken har mätnodernas mjukvara startats och ställts in genom att sända signaler från avläsningseenheten, detta förfarande har varit tidskrävande samt fodrat

telefonkontakt med en tekniker som varit expert på utrustningen. Erfarenheten blev att hantering och användning av mätnoderna behöver utvecklas. Mätnoderna skall vara förberedda så att de enkelt kan startas upp och få kontakt med avläsningsenheten på rätt sätt. Optimalt vore att kunna starta mätnoderna med en ”magnetnyckel” och därefter bara fästa dem på armeringen och gjuta in dem.

Storleken på mätnoderna har varierat i fältförsöken, de första mätnoderna var 2-7 cm stora medan de sista mätnoderna var 4-15 cm stora. Erfarenheten blev att storleken på de sista mätnoderna var något för stort, de första nodernas storlek var däremot helt acceptabelt. Övre gränsen kanske går vid storleken av ett cigarettpaket eller en snusdosa ungefär.

Det visade sig att efter noderna monterats på armeringsjärnen i gjutformen så hade gjutpersonalen inte möjlighet ta hänsyn till dem. Vid gjutning går personalen omkring med kraftiga kängor på armeringsjärnet för att kunna fördela ut och vibrera den rinnande betongen. Erfarenheten blev att mätnoderna behöver vara så robusta att de klarar belastningen av att en person i 100kg-klassen stampar på den med grova kängor. Samt även klara ett direkt slag av en skyffel eller vibreringsstaven.

Mätnoderna monteras i gjutformen samma dag eller någon dag innan gjutning. När det gäller temperaturmätning under härdningsförloppet så är den intressanta tiden högst ett par veckor, därefter har härdningen gått så långt att värmeutvecklingen i princip avstannat. Erfarenheten blev att livslängden hos batteriets i mätnoden bara behöver vara några veckor, eller högst en månad. Därefter är det normalt sett inte intressant att följa temperaturen i de flesta typer av betongkonstruktioner.

Resultaten från de jämförande mätningarna har visat att det finns en temperaturskillnad mellan mätvärdena för de olika metoderna. Temperaturförloppen följer varandra väl med de olika metoderna men absolutvärdet skiljer en till två grader. Erfarenheten blev att det finns en skillnad mellan olika mätmetoder som behöver utredas. I de fall där det ställs höga noggrannhetskrav på mätningens absolutvärde bör man överväga att kalibrera mätnoderna individuellt i ett känt klimat innan de monteras.

I samtliga fältförsök har det varit svårt att få tillräcklig räckvidd på signalen för att på ett tillfredställande kunna sända mätvärden till avläsningsenheten. Erfarenheter från fältförsöken har visat att det sannolikt är möjligt ur gjutsynpunkt att använda ytantenner på mätnoderna. Antennerna behöver i så fall antagligen vara så flexibla att det kan sticka rakt upp ur betongytan eller hängas ut över kanten på betongformen och fjädra tillbaka efter att de blivit nedtrampade. Dock får de inte utformas så att de förstör betongytan när de böjs av slodan som används för att avslutningsvis jämna till betongytan.

5 Fortsatt utvecklingsarbete

Det största problemet i fältförsöken har varit att få sådan räckvidd hos signalen att den når ut ur armerad betong och ytterligare ett erforderligt antal meter till avläsningsenheten.

Nästa steg borde därför vara att utreda räckvidden hos olika frekvenser av överföringssignalen genom eller ut ur en armerad betongkonstruktion. Sannolikt kan det vara så att betongen effektivt dämpar ut vissa frekvenser. Armeringen i betongen påverkar kanske andra typer av signaler, sannolikt störs ett magnetfält kraftigt om ett armeringsnät placeras mitt i det.

Genom att montera ett antal olika instrument i en armerad betongkub skulle man under kontrollerade förhållanden kunna studera hur olika frekvenser påverkas av de omgivande materialen, beroende på var de sitter i förhållande till betongytan och armeringen.

Sannolikt borde det finnas en stor skillnad hos matsignalens utbredning och räckvidd om mätnoden placeras på ett större djup i betongen så att den hamnar innanför armeringen än om den placeras på ett grundare djup så den hamnar på utsidan av armeringen. Kunskap om detta och liknande samband kan vara till stor hjälp vid utformningen av en användbar produkt.

Den trådlösa utrustningen för temperaturmätningar behöver sannolikt utvecklas så den anpassas för den ena av de två huvudtyperna av mätsituationer innan den är klar att produktifieras. I det första fallet varierar betongens tjocklek och armeringens placering relativt lite, vilket kan innebära att optimerat system kan designas.

I det andra fallet så finns det en stor variation på de olika typerna av formsättningar etc som kan förekomma. Vid exempelvis gjutning mot spont och andra typer av stålformar kan mätsignalen komma att skärmas kraftigt. Andra fall som extremt tjocka konstruktioner och motgjutningar där ena sidan av konstruktionen gränsar mot mark kan speciella typer av kraftiga antenner och återsändande system vara nödvändiga.

1. Den vanligaste mätsituationen för temperaturmätningar i nygjuten betong anges vara att optimera tiden för formrivning och andra aktiviteter som styrs av betongens hållfasthetstillväxt. I det fallet så monteras mätnoderna i formen till ett betongbjälklag. Efter gjutning härdar betongen, den så kallade hydratationen är en exoterm reaktion som avger värme. Resultatet från temperaturmätningen används för att beräkna ekvivalent mognadsålder för betongen och därmed hållfasthetstillväxten i konstruktionen. Uppgifter om hållfasthetstillväxten används primärt för att kunna optimera tidpunkten för rivning av gjutformen och takten man kan bygga vidare utan att äventyra konstruktionens stabilitet.

2. Den andra mätsituationen för temperaturmätningar i nygjuten betong uppges vara att verifiera kraven på maximal temperatur i betongkonstruktionen under härdningsförloppet. Utrustningen kan i dessa sammanhang även användas för att prognostisera de maximala temperaturnivåerna i en massiv betongkonstruktion. Med bakgrund av den informationen kan man med olika aktiviteter gå in och styra hydratationshastigheten och temperaturutvecklingen för att därmed kunna förhindra ofrivillig sprickbildning.

6. Referenser

- Al-Qadi, I L, o.a. 1995. *Dielectric Properties of Portland Cement Concrete at Low Radio Frequencies.*, Journal of Materials in Civil Engineering.
- Council, Strategic Development. 2002. *Roadmap 2030: The U.S. Concrete Industry Roadmap.* u.o. : Strategic Development Council.
- Dalke, Roger A., Holloway, Christopher L., McKenna, Paul., Johansson, Martin. And Ali, Azar S. 2000. *Effects of Reinforced Concrete Structures on RF Communications.* IEEE transactions on electromagnetic compatibility, Vol. 40, Nr. 4, ss.486-495.
- ERO Frequency Information System. [Online] [Citat: den 22 June 2009.] <http://www.efis.dk/>.
- Jacobs Laurence J., Owino Joseph O. (2000) *Effect of Aggregate Size on Attenuation of Rayleigh Surface Waves in Cement-Based Materials.* Journal of Engineering Mechanics
- Norris, Ashley, Saafi, Mohamed och Romine, Peter. 2008. *Temperature and moisture monitoring in concrete structures using embedded nanotechnology/micromechanical systems (MEMS) sensors.*, Construction and Building Materials, Vol. 22, ss. 111-120.
- Richards, John A. 2008. *Radio Wave Propagation - An Introduction for the Non-Specialist.* Canberra : Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Robert, Antoine. 1998. *Dielectric permittivity of concrete between 50 Mhz and 1 Ghz and GPR measurements for building materials evaluation.* Journal of Applied Geophysics, Vol. 40, ss. 89-94.
- Saafi, Mohamed. 2005. *Preliminary evaluation of MEMS devices for early age concrete property monitoring.* Cement and Concrete Research, Vol. 35, ss. 2158-2164.
- SensoByg. [Online] [Citat: den 22 06 2009.] <http://www.sensobyg.dk/>.
- Sjöberg Anders & Blomgren Jakob. 2004. *Fuktmätning med trådlösa sensorer inom byggindustrin, - en studie av byggbranschens framtida fuktmättningsbehov.* Avd Byggnadsmaterial, Lunds Universitet, TVBM-3123 2004.
- Sjöberg Anders, Blomgren Jakob, Erlandsson Max, Johansson Christian. 2007. *Trådlösa fuktsensorer inom byggindustrin, - en fältsudie av två trådlösa system för fukt och temperaturmätning.* Avd Byggnadsmaterial, Lunds Universitet, TVBM-3139.
- Soutsos, M.N., Bungey, J.H., Millard, S.G., Shaw, M.R. Shaw, Patterson, A. 2001. *Dielectric properties of concrete and their influence on radar testing.* NDT&E International, Vol. 34, ss. 419-425.