



Sensorer i bygninger

Fugt i boliger og byggeri



Forord

Innovationskonsortiet SensoByg er dannet i 2007. Formålet har været at udvikle og demonstrere trådløse overvågningssystemer til brug i byggeriet samt i store konstruktioner som for eksempel broer og tunneler.

SensoByg har været støttet økonomisk af Forsknings- og Innovationsstyrelsen i perioden fra 2007 til 2010. Deltagerne i projektet har været:

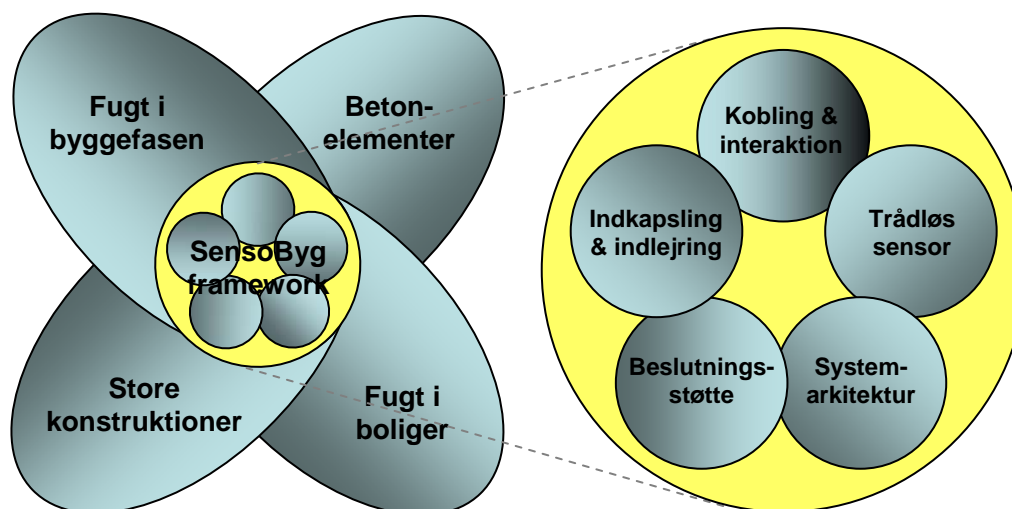
Aarhus Universitet, Datalogisk Institut	Alexandra Institutet	Danmarks Tekniske Universitet, DTU Elektro
Lunds Universitet, Fuktcentrum	Statens Byggeforskningsinstitut, AAU, Afd. for Byggeri og Sundhed	Teknologisk Institut
Arbejdernes Andels Boligforening (AAB)	Betonelement A/S	Brunata A/S
C P International (CPI)	EXPAN A/S	Femern Bælt A/S
Forsikring & Pension	KPC Byg A/S	Mjølnér Informatics A/S
Rambøll A/S	Tempress A/S	Vejdirektoratet

Yderligere information om deltagerne fremgår projektets hjemmeside: www.SensoByg.dk.

De trådløse overvågningssystemer, som er målet med konsortiets arbejde, er indlejret i konstruktionerne og bygningerne, og der er udviklet tilhørende beslutningsstøtteværktøjer. SensoByg har demonstreret muligheder og vurderet teknologier i følgende demonstrationsprojekter:

- D1 – Fugt i boliger og byggeri (byggeriets driftsfase)
- D2 – Store konstruktioner, herunder broer og tunneler samt store stålkonstruktioner
- D3 – Betonelementproduktion
- D4 – Fugt i byggefasen.

Foruden disse fire demonstrationsprojekter er der gennemført en række forskningsemner omkring trådløse systemer og sensorer til indlejring i byggematerialer. Nedenstående figur illustrerer disse emner i cirklen til højre.



Ved gennemførelsen af demonstrationsprojektet D1 og i udarbejdelsen af rapporten om sensorer i bygninger, fugt i boliger og byggeri, har udover Statens Byggeforskningsinstitut (SBI) indgået følgende parter:

- Anders Sjöberg, Lunds Tekniska Högskola, Lunds Universitet
- Casper Rosengaard Villumsen, Teknologisk Institut
- Freddy Cronqvist, AAB
- Jørgen Wegener, Byggeskadefonden
- Kenneth Olsen, Brunata
- Lars-Olof Nilsson, Lunds Tekniska Högskola, Lunds Universitet
- Magne Hansen, Teknologisk Institut
- Peter Kyhl Tange, Brunata
- Søren Svanebjerg, Brunata
- Tine Aabye, Forsikring & Pension, Forsikringens Hus

Seniorforsker, civilingeniør, ph.d. Torben Valdbjørn Rasmussen, SBI, har været projektleder af demonstrationsprojektet D1, mødeleder og redaktør af gruppens afrapportering og derudover har Niels Samsø Nielsen støttet det redaktionelle arbejde.

De enkelte parter takkes for deres faglige bidrag.

Indholdsfortegnelse

1	Resumé	4
2	Indledning	5
3	Sensorsystem anvendt i D1	7
3.1	Sensorer	7
3.2	Modtager/reciever	8
3.3	Lukket indkapsling.....	8
3.4	Software og konfigurering	9
3.5	Anvendelsesområder	9
4	Beskrivelse af Tværvangen	10
4.1	Termografering	12
4.2	Baderummenes opbygning	12
4.3	Placering af sensorer	12
4.4	Instrumenteringen	14
4.5	Data	15
4.6	Erfaringer og udfordringer med sensorer og trådløs kommunikation	16
5	Mock-ups	17
5.1	Konstruktioner anvendt til mock-up af baderummenes opbygning.....	17
5.1.1	Betongulv	17
5.1.2	Lette vægge på stålregler	18
5.1.3	Murede vægge.....	19
5.2	Placering af sensorer	19
5.3	Instrumenteringen i vægge og gulv	20
5.3.1	Montering af sensorer i Betongulve	20
5.3.2	Lette vægge på stålregler	21
5.3.3	Tunge vægge.....	22
5.3.4	Den endelige placering af sensorer.	23
5.4	Dataoverførelse fra sensorer	24
5.4.1	Forsøgsbeskrivelse	25
5.5	Data	25
5.6	Data mønstre	25
5.6.1	Forsøg nr. 1, uden lækager	25
5.6.2	Forsøg nr. 2, med lækager	26

5.7	Erfaringer og udfordringer med sensorer og trådløs kommunikation	27
5.7.1	Sensorernes reaktioner	28
5.7.2	Beslutningsstøttesystemer	28
5.7.3	Sensorernes placering, lette vægge med stålregler	28
5.7.4	Sensorernes placering, betongulve	28
6	Indeklimadata	29
7	Beslutningsstøtte systemer	29
7.1	Anvendelsen af beslutningsstøttesystemer	29
7.2	Fire beslutningsstøttesystemer til brug og drift af bygninger	30
7.2.1	Beslutningsstøttesystemer relateret til vandforbrug	30
7.2.2	Tilstandsvurdering af bygningskomponenter	30
7.2.3	Beslutningsstøttesystem til sikring af acceptabelt indeklima	32
7.2.4	Beslutningsstøttesystem for fugtovervågning af baderum i driftsfasen	35
8	Cost-Benefit	37
8.1	Uventilerede tage:	37
8.2	Lette badeværelser:	38
9	Perspektivering	40
10	Referencer	42

1 Resumé

SensoByg (Sensorbaseret overvågning i byggeriet) er et innovationskonsortium, der har haft til formål at udvikle og demonstrere prisbillige, driftsikre overvågningssystemer til byggeriet og andre store konstruktioner ved hjælp af indlejret, trådløs sensorteknologi og intelligente beslutningsstøtteværktøjer.

Denne rapport omhandler arbejdet, som er gennemført i arbejdsgruppen 'Sensorer i bygninger, D1 - Fugt i boliger og byggeri'. Projektgruppen har arbejdet med følgende problemstillinger:

- Tilpasning af sensor-indkapslinger og montering til brug i lette og tunge vægge og indstøbt i betondæk
- Indbygning af sensorer i eksisterende konstruktioner
- Opsætning af datanetværk til trådløs datatransmission
- Laboratorietest af skadesudbredelse monitoreret af sensorer
- Beslutningsstøttesystemer knyttet til vandforbrug, tilstandsvurdering, indeklima og fugtovervågning i bygninger og konstruktioner i drift
- Cost-benefit-betragtninger ved anvendelsen af sensorteknologi i bygninger
- Perspektiver for 'next generation' sensorbaseret overvågning i byggeriet

Der er fokuseret på overvågning og udarbejdelsen af algoritmer til beslutningsstøttesystemer for målte data af fugt og temperatur i byggeriet via trådløse sensorer. De største udfordringer har været indlejring af sensorer i våd beton og trådløs overførsel af data fra eksisterende konstruktioner og konstruktioner med meget metal, armeringsnet og underlag af svalehaleprofilerede stålplader. Ved forsøg i laboratorium på mock-ups af baderum er fugt og temperatur monitoreret for en uskadet og en skadet konstruktion. Skaderne er påført konstruktionen ved at bore huller i den indvendige flisebeklædning og gennem vådrumsmembranen. For en konstruktion med en skadet vådrumsmembran viser resultaterne, at fugt breder sig mere end forventet i lette vægge, der er opbygget på hulprofilerede stålregler. Desuden viser data, at det er muligt at registrere en lækage i vådrumssikringen af et betondæk i en afstand på 0,8 meter. For en intakt vådrumsmembran viser data, at der forekommer et øget fugtniveau ved øget temperaturpåvirkning. Forhold, der skal tages i betragtning ved databehandling for værktøjer til beslutningsstøttesystemer.

2 Indledning

Anvendelse af sensorer til overvågning af egenskaber med betydning for tilstanden af bygninger giver oplagte muligheder for store samfundsøkonomiske besparelser og et betydeligt eksportpotentiale for danske højteknologiske virksomheder.

Overvågning og kontrol af fugtindholdet har fundamental betydning under opførelse og færdiggørelse af nye bygninger og konstruktionsdele samt i den efterfølgende bygningsdrift. Fugtindholdet er en vigtig styrende parameter med hensyn til efterbearbejdning, etablering af gulvbelægning, overfladebehandling eller opsætning af vægbeklædning. Forkert tidspunkt for udførelse kan have betydelige konsekvenser for etableringsøkonomien, efterfølgende skadesoprettelse eller for indeklimaet i den færdige bygning.

Ved hjælp af sensorer er det muligt at gennemføre en løbende, detaljeret fugtmåling med den ønskede dataopløsning. Dermed er det muligt at udføre den reelt nødvendige, detaljerede fugtmåling i tilstrækkeligt omfang med trådløs sensorteknologi.

Bygninger repareres og vedligeholdes i dag typisk ud fra en visuel inspektion og/eller ved målinger af enkelte holdbarhedsmæssigt betydende egenskaber på udvalgte bygningsdele, hvoraf bl.a. fugtindholdet er en vigtig parameter. Ofte opdages fejl og skader ikke i tide, hvilket kan få store økonomiske, sikkerhedsmæssige eller sundhedsmæssige konsekvenser.

Med trådløs sensorteknologi er det demonstreret, at der er basis for at videreudvikle sensorteknologien til overvågning af bygninger under opførelse og drift. Der eksisterer allerede i dag flere forskellige sensorer til anvendelse indenfor byggeriet for eksempel til måling af temperatur, fugt, deformationer, elektrokemisk potentiale, korrosionsaktivitet og kloridindhold. Fiberoptiske sensorer er demonstreret i forbindelse med broer og skibe til måling af belastning og spændingstilstand. Anvendelse af disse sensorer er stadig forholdsvis begrænset, hvilket i det væsentlige skyldes faktorer som:

- Økonomi.
- Sensorer er typisk konstrueret og fremstillet som selvstændige komponenter, der for nogles vedkommende forbindes med kabler.
- Sensorer med tilhørende dataopsamling og system til evaluering af måleresultater leveres sjældent som en samlet løsning, hvorfor slutbrugeren typisk ikke selv er i stand til at træffe beslutninger om handlinger, der er baseret på data direkte fra sensorerne.

Anvendelse af indlejrede, trådløse sensorer i byggeriet er tidligere behandlet i bl.a. rapporten 'Indlejret teknologi i byggeriet' fra Erhvervs- og Byggestyrelsen i 2006, Den Europæiske Teknologiplatform for byggeriet, www.ectp.org og rapporten 'På bølgelængde - Teknologisk Fremsyn om mobil og trådløs kommunikation' fra Forsknings- og Innovationsstyrelsen. Anvendelse af indlejrede, trådløse sensorer i byggeriet kan også betragtes som et supplement til 'Det Digitale Byggeri' og er i tråd med et teknologisk fremsyn om IKT.

Formålet med SensoByg er at udvikle og demonstrere fordelene ved anvendelse af prisbillige og driftsikre overvågningssystemer i byggeriet og i andre store konstruktioner ved hjælp af indlejret, trådløs sensorteknologi og intelligente beslutningsstøtteværktøjer. Projektet er fokuseret på overvågning af fugt og temperatur i byggeriet via trådløse sensorer og er opdelt i et antal arbejdsgrupper. Arbejdsgruppen for demonstrationsprojektet 'D1 – Fugt i boliger og byggeri' har arbejdet med de trådløse overvågningssystemer. Systemerne er vist indlejret og demonstreret til at virke i konstruktioner og bygninger, og der er udviklet tilhørende algoritmer til beslutningsstøtteværktøjer.

Det rapporterede arbejde skal læses i sammenhæng med tilhørende bilag. Bilag findes på www.sensobyg.dk.

Rapporten anviser nye teknologiske metoder for tilstandsovervågning i forbindelse med produktion, udførelse og drift af bygninger. De teknologiske muligheder, der er forbundet med anvendelsen af trådløse sensorer, skal tilknyttes et beslutningssystem med brug af den fremmeste viden om bygninger og konstruktioner, der er forenelig med de praktiske krav til anvendelse med hensyn til pris, robusthed og brugervenlighed for at opnå maksimal udnyttelse af teknologien.

Kernen i en succesfuld anvendelse af indlejrede, trådløse sensorer i byggeriet er tolkningen af sensor-signalerne. For eksempel hvad et givent fugtniveau målt på et givent sted i konstruktionen har af betydning og hvilke konsekvenser, der skal drages af målingen. Omvendt vil detaljerede, kontinuerte målinger give mulighed for justering og forbedring af eksisterende modeller for betydningen af fugtindhold og temperatur for egenskabsudviklingen og tilstanden i bygningsmaterialer og konstruktioner.

De fleste mekanismer, der forårsager et dårligt indeklima i boliger og nedbrydning i konstruktioner, forudsætter, at der er vand til stede. Vand kan medføre råd og svamp, kemiske omdannelser, frostsprængninger og kan være kilde for indtrængning af skadelige stoffer som salte og klorider. Men det er ikke kun fugt, der er årsagen. Temperatur har også betydning.

Fugt kan tilføres en bygning fra forskellige kilder, for eksempel fra byggeprocessen, fra regnvejr, fra vandskader og fra brugernes aktiviteter og adfærd.

For beton gælder specielt, at vand tilføres som led i produktionsprocessen og forbruges i forbindelse med hærdning, og at beton kræver udtørring for at få overskudsvandet væk. Temperaturen er også en væsentlig parameter for egenskabsudviklingen af beton, fordi den er vikarierende parameter for udvikling af styrke og holdbarhed.

Desuden vil kontinuert fugtmonitoring i indeluften kunne bidrage til at minimere sundhedsproblemer i boliger og på arbejdspladser.

3 Sensorsystem anvendt i D1

Det anvendte sensorsystem i D1 består af aktive sensorer, der indbygges i en konstruktion og sender data trådløst til en modtager. Fra modtageren sendes data via mobiltelefonnettet til en central dataopsamling, hvortil der er adgang via internet. Der er også mulighed for direkte computerforbindelse til modtageren, så data kan læses, når de modtages.

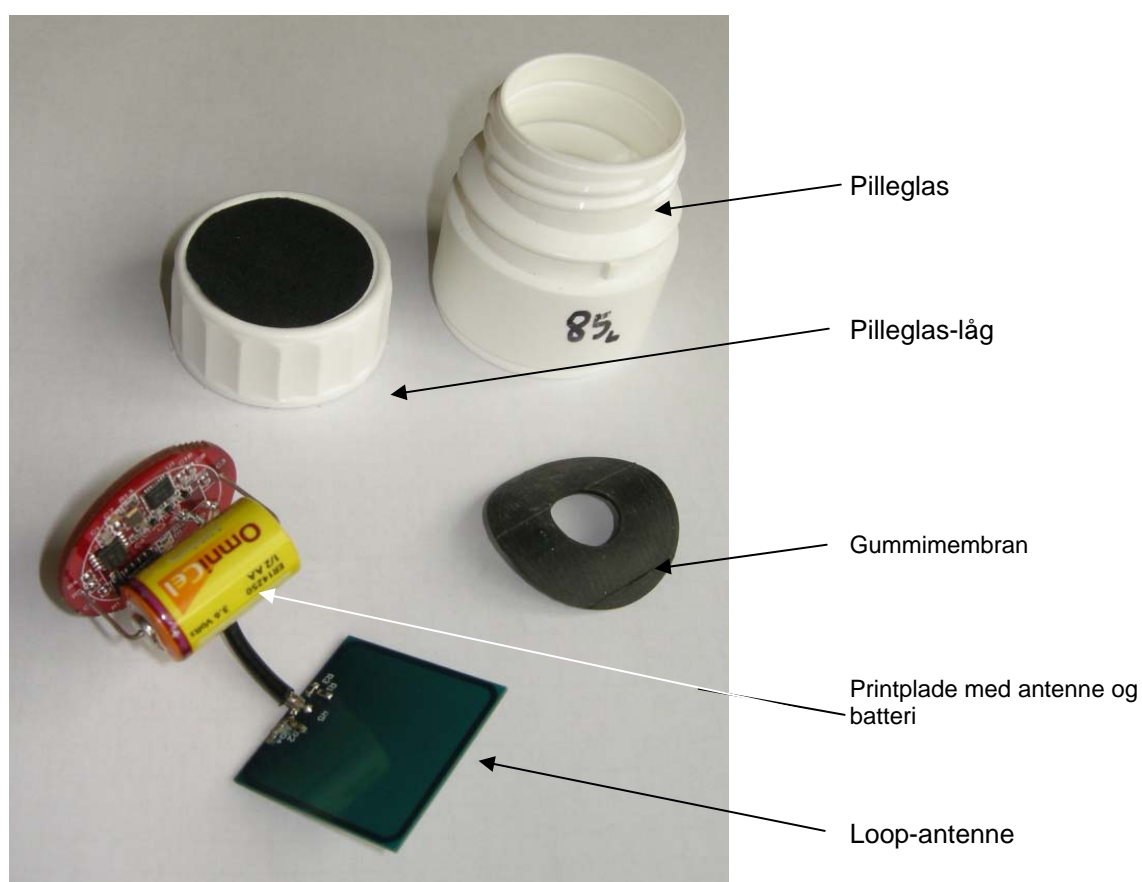
Systemet er udviklet af Teknologisk Institut. Sensorerne er aktive, hvilket betyder, at de er indstillet til at sende målte data for temperatur og relativ luftfugtighed til en modtager efter et valgt tidsinterval. Indstillingerne kan ændres, når det ønskes, så længe, der er kontakt til sensoren.

3.1 Sensorer

En sensor består af en printplade, hvortil antenne og batteri er monteret. Sensoren placeres i et 'pilleglas' (en lukket indkapsling), hvor låget har et boret hul på ca. $\varnothing 8$ mm, dækket af et goretex-tekstil, der er påklisteret for at undgå direkte vandpåvirkning. For at sikre at skruelåget er helt tæt, monteres en gummimembran i låget, der yderligere tætnes med lim for ekstra tæthed mellem låg og pilleglas. Printpladen er lakeret med klar lak for at undgå, at kondensdannelse kortslutter systemet.

Sensorerne er testet i fugtkammer forud for indbygningen i konstruktionerne for at sikre, at de måler korrekt.

Sensorer og den anvendte indkapsling er vist på figur 1 og 2.



Figur 1. Opbygning af pilleglas-sensoren.



Figur 2. Den anvendte, lukkede indkapsling ('pilleglas') uden låg.

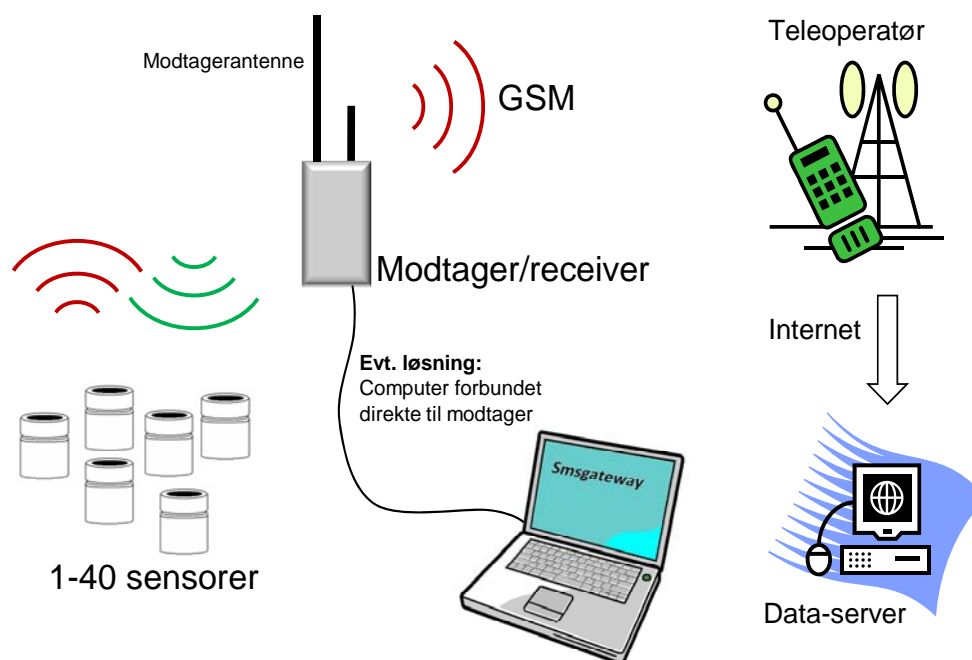
Antennen sender information med en frekvens på 433 Hz, og dataoverførsel sker i et interval, der kan sættes fra 16 sekunder til en gang i døgnet. Batteriets spænding er i udgangspunktet på 3,6 V. Sammen med de målte data følger også batteriets aktuelle spænding, hvilket giver information om batteriets rest-levetid (og dermed også sensorens rest-levetid, hvis den for eksempel er indstøbt). Med et fornuftigt valgt måleinterval og en korrekt udførelse kan en sensor forventes at sende data i mange år. Er dette imidlertid ikke tilfældet, er der set afladning af batterier indenfor ganske få måneder.

3.2 Modtager/reciever

Modtageren (også kaldet 'receiver' eller 'gateway') fanger signalerne fra sensoren og sender dem videre via mobiltelefon-nettet til en dataserver, der er placeret på Teknologisk Institut. Der kan også etableres en samtidig forbindelse via kabel til en computer, der med programmet Smsgateway gør det muligt at monitorere og opsamle data samtidig med, at de modtages. Modtageren skal tilføres strøm, men har et indbygget batteri, som sikrer data ved afbrydelser på op til nogle timer.

3.3 Lukket indkapsling

Figur 3 viser den principielle opbygning af systemet.



Figur 3. Opbygning af system med trådløse sensorer, modtager med trådløs datatransmission via mobiltelefon-nettet til dataserver. Eventuelt kan der vælges en direkte forbindelse fra modtageren til en computer, der har softwaren Smsgateway installeret.

3.4 Software og konfiguration

Med programmet Smsgateway er det muligt at konfigurere sensorerne, når en computer er forbundet til en modtager, der er indenfor sensorernes rækkevidde. Programmet kan også benyttes til at se data, der samtidig kan gemmes direkte i en resultatfil i stedet for at hente data fra serveren, som modtageren også sender til.

I programmet er det muligt at indstille, hvor lang tid der skal gå mellem sensoren sender data ud, og om den skal lytte efter modtagerens bekræftelse på, at data er modtaget. I forhold til batterilevetiden er det meget vigtigt, at disse indstillinger vælges optimalt, så der kan opnås en lang levetid.

Systemet har mulighed for tovejs-kommunikation mellem sensor og modtager, og det tjener to formål:

- Robusthed overfor datakollision
- Mulighed for at ændre sensor-opsætningen undervejs.

Når sensorer er indstillet til tovejs-kommunikation, er det meget vigtigt, at der er en modtager til at tage imod data, da sensoren ellers vil bruge meget strøm på at lytte efter svar fra modtageren. Det er muligt at slå tovejs-kommunikationen fra, men så vil det til gengæld ikke senere være mulighed for at ændre i indstillingerne på en indbygget sensor.

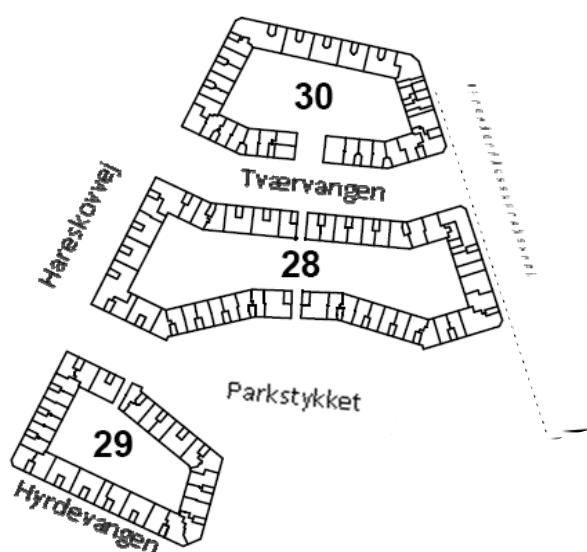
3.5 Anvendelsesområder

Systemet er udviklet til at blive benyttet i konstruktioner, fx i bygninger eller anlægskonstruktioner. Sensorer vil også kunne anvendes til indeklimamålinger, men der findes mere diskrete og veludvik-

lede systemer til dette, hvor batterilevetid ikke er et problem, da batterierne kan skiftes undervejs eller sluttes til en stikkontakt.

4 Beskrivelse af Tværvangen

Lejlighederne i Tværvangen i det nordvestlige København er en del af boligselskabet AAB's afdeling 28-30, der under projektet har været gennem en omfattende ombygning og modernisering. Bebyggelsen omfatter tre boligkarréer med adresser på Utterslevvej, Hareskovvej, Frederikssundsvej, Tværvangen, Parkstykket og Hyrdevangen se figur 4

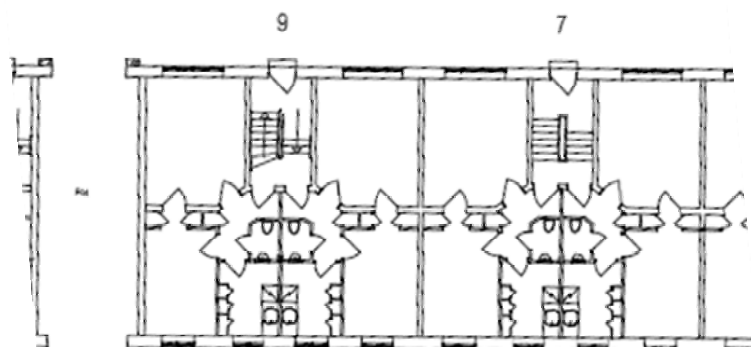


Figur 4. De tre boligkarréer i AAB's afdeling 28-30.

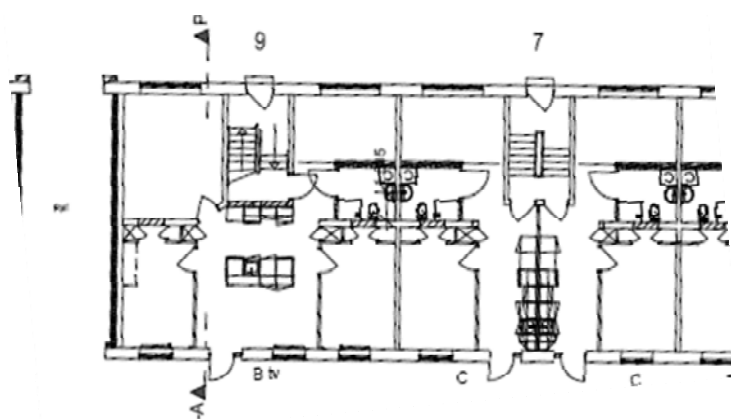
Tværvangen 7 og 9 har været prøveopgange, hvor arbejdet er blevet sat i gang forud for den resterende ombygning af de øvrige tre karréer.

I projektet sammenlægges et stort antal lejligheder, så der i mange opgange efterfølgende kun er én lejlighed pr. etage, se figur 5 til 8. Der bibeholdes dog et væsentligt antal toværelses-lejligheder. Der indrettes nye køkkener og badeværelser i alle lejligheder samt en ny fordeling af opholdsrummene. Vinduerne udskiftes ikke, da de eksisterende vinduer ikke er udskiftningsmodne, ligesom der ikke foretages en efterisolering af facaderne.

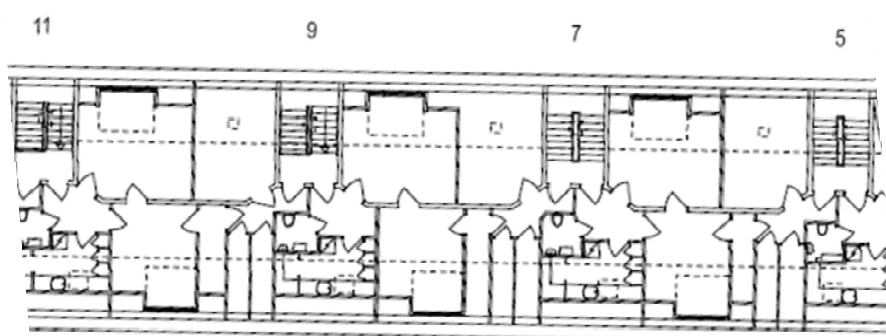
Sensobyg-projektet har haft mulighed for adgang til to lejligheder i prøveopgangene og har valgt en stuelejlighed og en taglejlighed til demonstration af det udviklede sensorsystem.



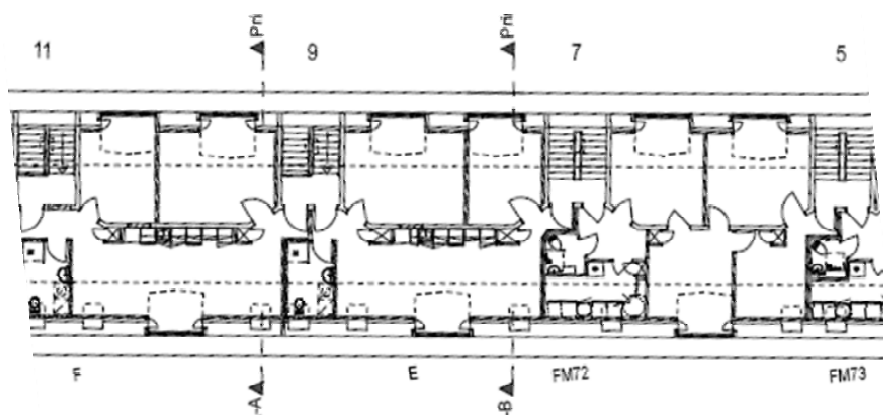
Figur 5. Opgang 7 og 9, stueplan. Før ombygning



Figur 6. Opgang 7 og 9, stueplan. Efter ombygning



Figur 7. Tageligheder, opgang 7 og 9. Før modernisering.



Figur 8. Taglejligheder i opgang 7 og 9 efter modernisering.

4.1 Termografering

Termografering af stue- og taglejlighed i Tværvangen 9 er gennemført af Teknologisk Institut, Byggeri, den 16. maj 2008.

Detaljer om termograferingen kan ses i bilaget 'Rapport 1118506_Tværvangen_MLH08_011'.

4.2 Baderummenes opbygning

De eksisterende baderum nedrives inklusiv installationer. Der etableres nye badeværelser med nye installationer til vand, afløb og ventilation, og der sættes nye letbetonvægge op mod lejlighedens andre rum, mens den eksisterende kalksandstensvæg i lejlighedsskellet fortsat benyttes.

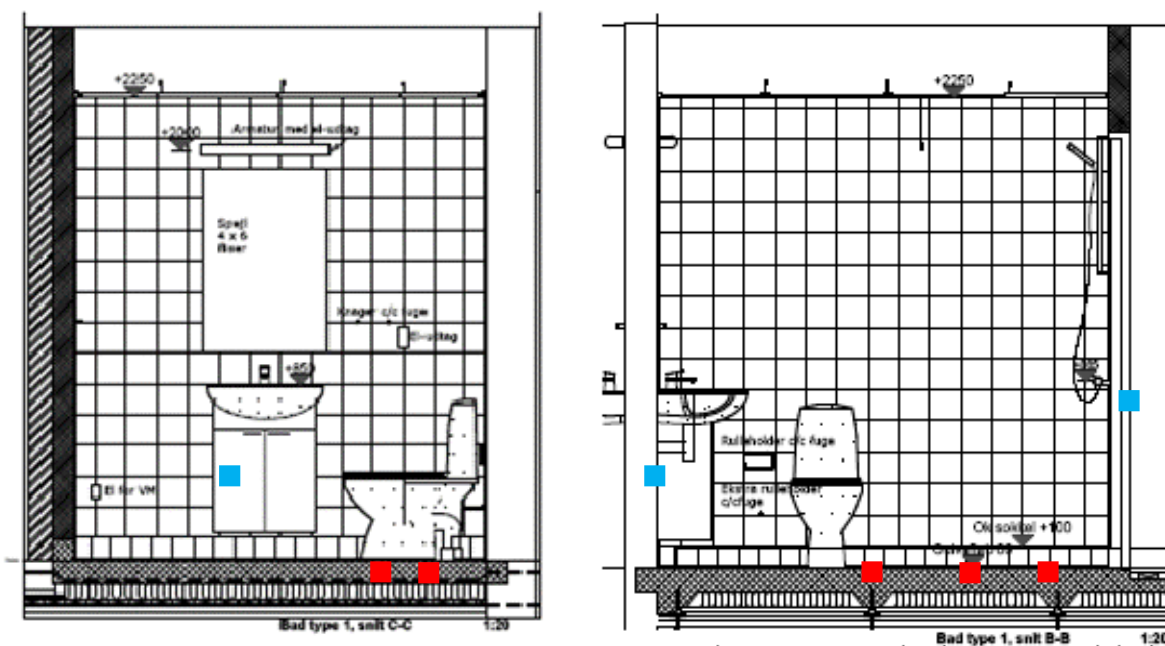
Den nye gulvkonstruktionen etableres ovenpå det eksisterende bjælkelag og forstærkes med ståldragere. Et betonlag udstøbes enten direkte på isolering og rio-net eller på en "svalehaleplade" ovenpå isoleringslaget.

4.3 Placering af sensorer

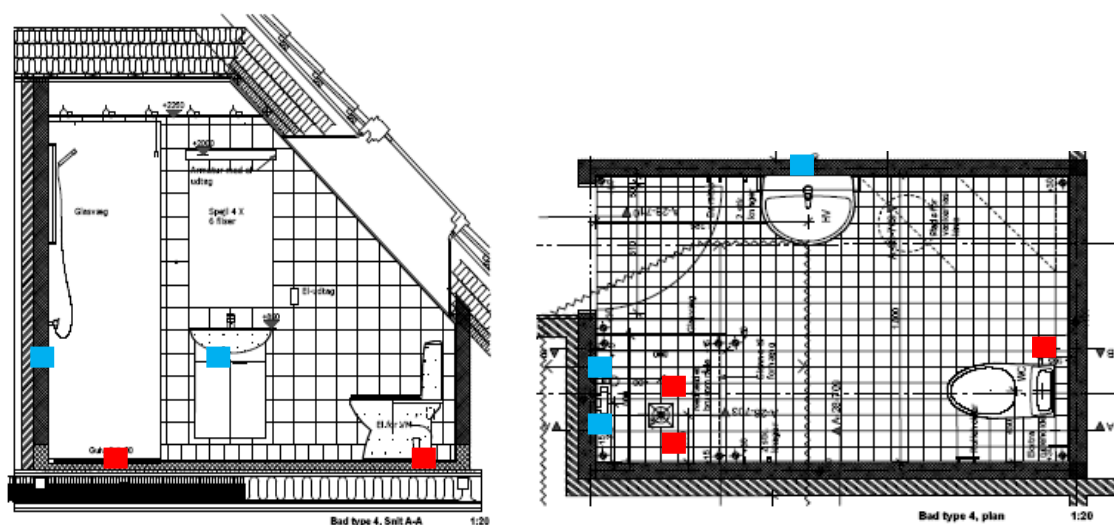
Der placeres sensorer i badeværelset i opgang nr. 7, stuen, og i nr. 9 i taglejlighedens badeværelse. Fugtskader i vådrum har størst risiko for at opstå ved rørgennemføringer i væg samt ved gulv afløb i væg og gulv. Utætheder eller fejl og mangler i vådrumsmembranen er også en væsentlig risiko. Det er derfor valgt at placere sensorer i gulv omkring bruserens gulv afløb samt gennemføring for afløb fra wc. I væggene placeres sensorer under gennemføringer for vand til bruser og til håndvasken. Lejlighederne fik hver monteret tre sensorer i væg og tre sensorer i gulv. Placeringen fremgår af tabel 1 og tegningerne på figur 9 og 10.

Sensorer i stue- og taglejlighed			
Stue, gulv	83	AE	BE
Placering	Ved toiletafløb	I bruseområdet (ca. 0,7 m fra gulvafløb)	Ved gulvafløb
Stue, væg	BF	A6	90
Placering	Under gennemføringer til håndvask	Under gennemføring til brus, venstre side	Under gennemføringer til brus, højre side
Tag, gulv	AD	9E	88
Placering	Ved toiletafløb	Ved gulvafløb, venstre	Ved gulvafløb, højre
Tag, væg	BD	86	96
Placering	Under gennemføringer til håndvask	Under gennemføringer til bruser, venstre side	Under gennemføringer til bruser, højre side.

Tabel 1: Placering af de 12 sensorer i stue- og taglejlighederne. Data fra sensor 'BE' og '90' er ikke modtaget.



Figur 9. Placering af sensorer i stuelejlighed. De blå firkanter markerer placering i væg og de røde i gulv svarende til tabel 1.



Figur 10. Placering af sensorer i taglejlighed. De blå firkanter markerer placering i væg og de røde i gulv svarende til tabel 1.

4.4 Instrumenteringen

Der er benyttet sensorsystemet, som er beskrevet i kapitel 3, men der har kun ved kontrol været tilsluttet en computer direkte til receiveren, der er placeret i kælderen under opgang 7. I stuelejligheden er gulvkonstruktionen udført med et rio-net, og her er sensorerne spændt fast med strips til rio-nettet inden udstøbning af betonlaget, se figur 11 og 12. I de nye vægge er sensorerne placeret i huller, der er boret ud i letbetonvæggen, mens der er fræset huller ud i den eksisterende kalksandstensvæg. Sensorerne er herefter fikseret med mørtel. I taglejligheden er betonlaget støbt ud på svalehaleplader. Dette er gjort uden overvågning fra delprojektets deltagere, da der ikke fra byggelederen har kunnet anvises en specifik dag for udstøbningen. Håndværkerne er instrueret i placeringen i betonlaget efter tegninger svarende til figur 9 og 10. Sensorer er placeret liggende, cirka midt i betonlaget. Placering i vægge er udført på samme måde som i stuelejligheden.



Figur 11. Placering af sensorer på rio-net



Figur 12. Placering ved gulvafløb



Figur 13. Placering af sensorer i letbetonvægge. Sensorerne omsluttet efterfølgende med mørtel og derefter lægges membran og opsættes fliser.

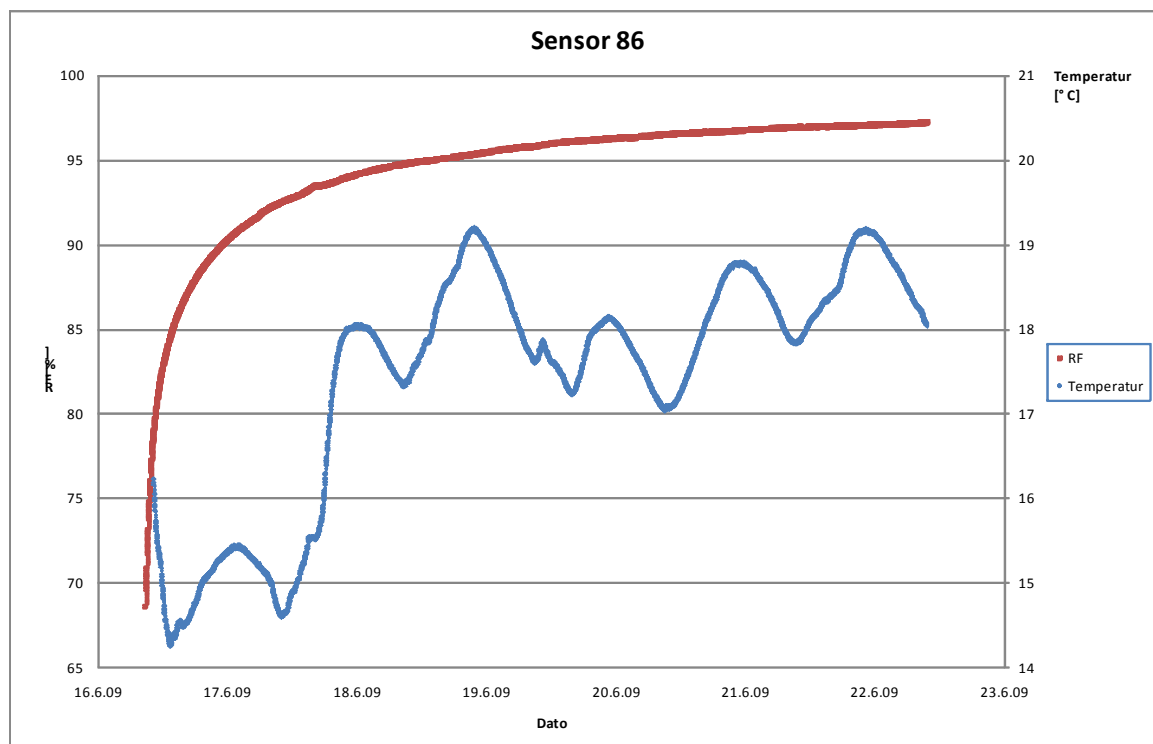


Figur14. Placering af sensor i kalksandstensvæg.

Data fra de trådløse sensorer er sendt til en receiver i kælderen og herfra cirka én gang i døgnet via mobiltelefon-nettet til en server på Teknologisk Institut.

4.5 Data

I bilaget 'Rapport resultater fra sensorer på Tværvangen' findes resultater fra de 10 ud af 12 sensorer, som det i forsøgsperioden er lykket at få data fra. Herunder er vist et uddrag for sensor '86', der er placeret i taglejlighedens letbetonvæg under gennemføringer til brus. Sensoren er indbygget den 16. juni 2009, hvor sensorens data stiger fra en relativ luftfugtighed og temperaturniveau svarende til omgivelserne til niveauet i mørtlen, der er anvendt ved indbygningen.



Figur 15. Data fra sensor '86' i perioden fra d. 16. til 23. juni 2009.

4.6 Erfaringer og udfordringer med sensorer og trådløs kommunikation

Monteringen af sensorer i konstruktionerne er let og kan udføres med værktøj og materialer, der normalt findes på en byggeplads. Det er vigtigt at få planlagt tidspunktet for udførelsen og være i kontakt med byggelederen, fordi sensorer for eksempel skal indbygges, før der lægges vådrumsmembran og fliser, ligesom sensorer i et pladsstøbt gulv skal være på plads i tide. På sigt vil denne type arbejde lattes, hvis indbygning af sensorer bliver en del af en arbejdsbeskrivelse og dermed byggelederens ansvar.

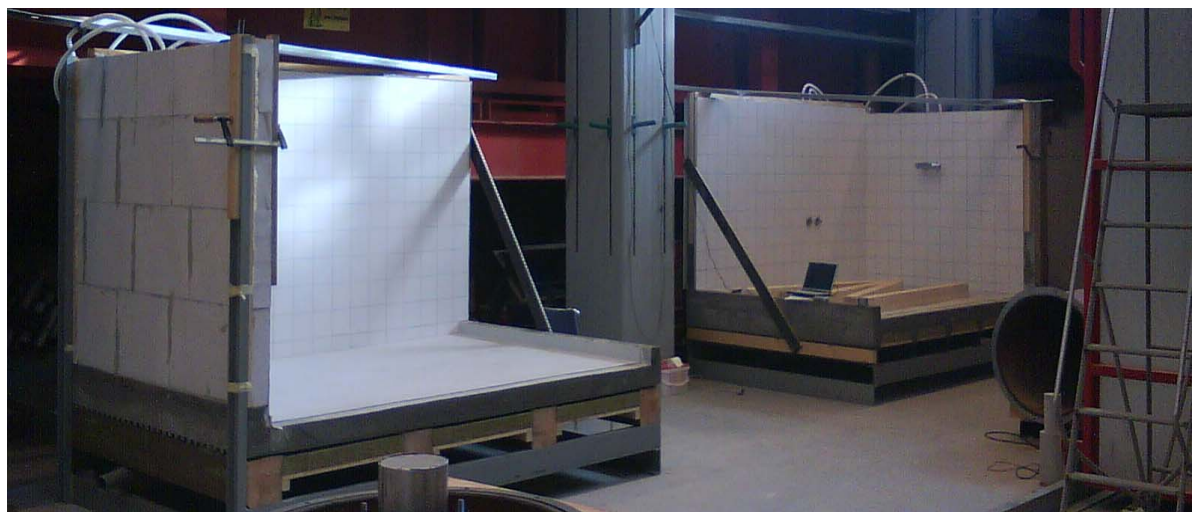
Det vil også være vigtigt at have et godt og uforstyrret sted til modtager af sensordata, så der ikke opleves dataudfald, når for eksempel håndværkere slukker for strømmen og glemmer at slutte den til igen. Samtidig skal placering være i overensstemmelse med sensorernes rækkevidde, og det skal sikres, at data uden problemer kan sendes ud af bygningen til en server. I en brugsperiode er det også vigtigt, at placeringen er let tilgængelig for service-eftersyn, men uden at den er til gene for beboere.

Det anvendte sensorsystem er et protosystem, der oplevede diverse 'børnesygdomme', som gjorde, at batterierne er blevet afladet meget hurtigt i forhold til den forventede levetid. Derfor er der ingen data for tiden efter beboernes indflytning i de ombyggede og moderniserede lejligheder. Der har været perioder uden strøm til receiveren, fordi håndværkere af og til har taget stikket ud af kontakten for at bruge den til værktøj. Det interne batteri i receiveren rækker kun til ca. to timer ved strømsvigt, så derfor har der været flere perioder, hvor der ikke er sendt data, fordi håndværkerne har glemt at slutte stikket til igen.

Receiver-problemerne er løst for sent i projektet, hvilket har medført, at en del af sensorernes batteristrøm er brugt på forgæves at sende data til receiveren. Det skyldtes, at sensorerne har været indstillet sådan, at de har sendt, indtil de har modtaget svar fra receiveren, hvilket har medført, at batterierne kun har holdt i få måneder. En optimal konfigurering og adgang til receiveren vil give en batteritid på flere år.

5 Mock-ups

Der er udført to mock-ups i form af to fuldsalamodeller af et vådrum med til sammen fire vægge og to gulvkonstruktioner med betonlag. Der er to forskellige opbygninger af gulvkonstruktionen i beton, én for hver mock-up. Hver mock-up har et gulvareal på 3×2 meter og en højde på ca. 2 meter, se figur 16.



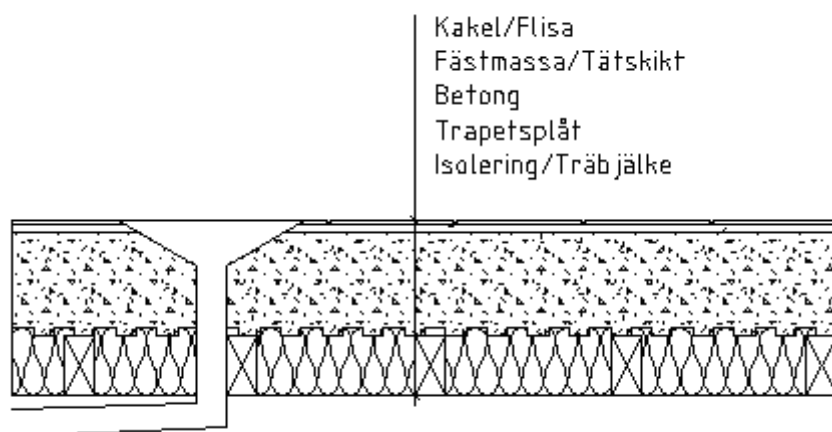
Figur 16. Mock-up til venstre har en gulvkonstruktion, der er opbygget på et træbjælkelag. Mock-up til højre har en gulvkonstruktion på et stålbjælkelag.

5.1 Konstruktioner anvendt til mock-up af baderummenes opbygning

Hver af de to mock-ups består af et gulv i beton, en muret væg og en let væg med skelet af stålregler. En nærmere beskrivelse af konstruktionernes opbygning er beskrevet i bilaget 'Rapport TVBM-5077' og summeret i følgende afsnit.

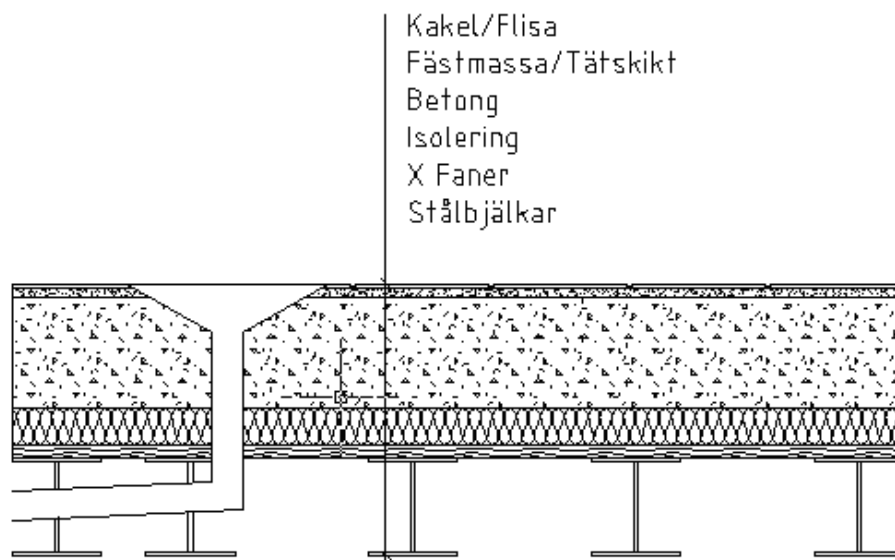
5.1.1 Betongulv

Gulvkonstruktionen i den af de to mock-ups, der er placeret til venstre på figur 16, er opbygget på et bærende bjælkelag af træ, der er isoleret med mineraluld. Oven over bjælkelaget er lagt en svalehaleprofileret stålplade som underlag for betonpladen. Fliser er lagt i fliseklæber direkte på vådrumssikringen som er påført betonpladen. Mellemrum mellem fliser er fuget, se figur 17.



Figur 17. Lodret snit i mock-up med en gulvkonstruktion opbygget med træbjælkelag og svalehale-profileret stålplade lagt som underlag for betonpladen vist på figur 16 til venstre.

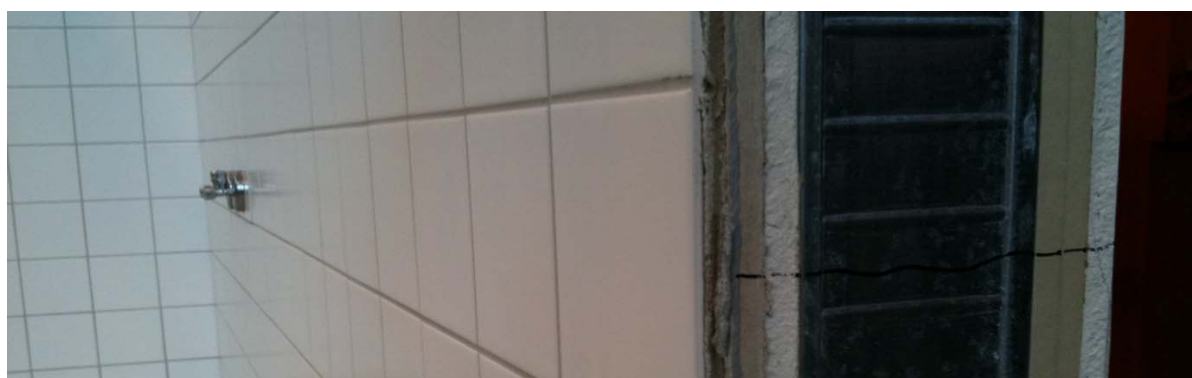
Gulvkonstruktionen i mock-up til højre på figur 16 er opbygget med et bærende bjælkelag af stål. Oven over bjælkelaget er der lagt en krydsfinerplade som underlag for et isoleringslag af mineraluld som underlag for betonpladen. Fliser er lagt i fliseklæber direkte på vådrumssikringen påført betonpladen. Mellemrum mellem fliser er fuget, se figur 18.



Figur 18. Lodret snit i mock-up med gulvkonstruktion, der er opbygget med et bjælkelag af stål, med et lag af krydsfiner, isolering, beton, vådrumssikring og fliser som vist på figur 16 til højre.

5.1.2 Lette vægge på stålregler

Alle de lette vægge har samme opbygning. De lette vægge er opbygget med fliser, der er lagt i fliseklæber på vådrumssikring påført et lag kalciumsilikatplader. Kalciumsilikatpladerne er fastgjort på plader af vådrumsgips, som er fæstnet på et skelet af stålregler fyldt ud med mineraluldsisolering. På bagsiden er der monteret gipsplader, se figur 19.



Figur 19. Lette vægge opbygget på et skelet af stålregler og kalciumsilikat- og gipsplader.

Oprindeligt skulle den ene mock-up have haft en let væg opbygget af gipsplader fæstnet på et skelet af stålregler og den anden en let væg opbygget af kalciumsilikatplader på et skelet af stålregler.

På grund af en misforståelse i kommunikationen under opbygningen af de to mock-ups er de to lette vægge opbygget på samme måde med en kombination af kalciumsilikat- og gipsplader.

5.1.3 Murede vægge

To typer af murede vægge anvendes i hver mock-up. For mock-up til venstre på figur 16 er den korte vægside muret op i blokke af letbeton med vådrumsmembran og fliser lagt i fliseklæber direkte på membranen, se figur 26. For mock-up til højre på figur 16 er den korte vægside muret op i tegl med vådrumsmembran og fliser lagt i fliseklæber direkte på membranen, se figur 25.

5.2 Placering af sensorer

De to mock-ups er bygget hos entreprenørvirksomheden Enemærke og Petersen i Danmark. Under opførelsen er samtlige sensorer monteret i konstruktionerne.



Figur 20. Indstøbning af sensor i betongulvet med svalehaleprofileret stålplade lagt som underlag for betonpladen.

Efter færdiggørelse og test af sensorerne er de to mock-ups transporteret på lastbil til yderligere test i Sverige på Lunds Universitet, Laboratoriet for bygningsmaterialer, se figur 21.



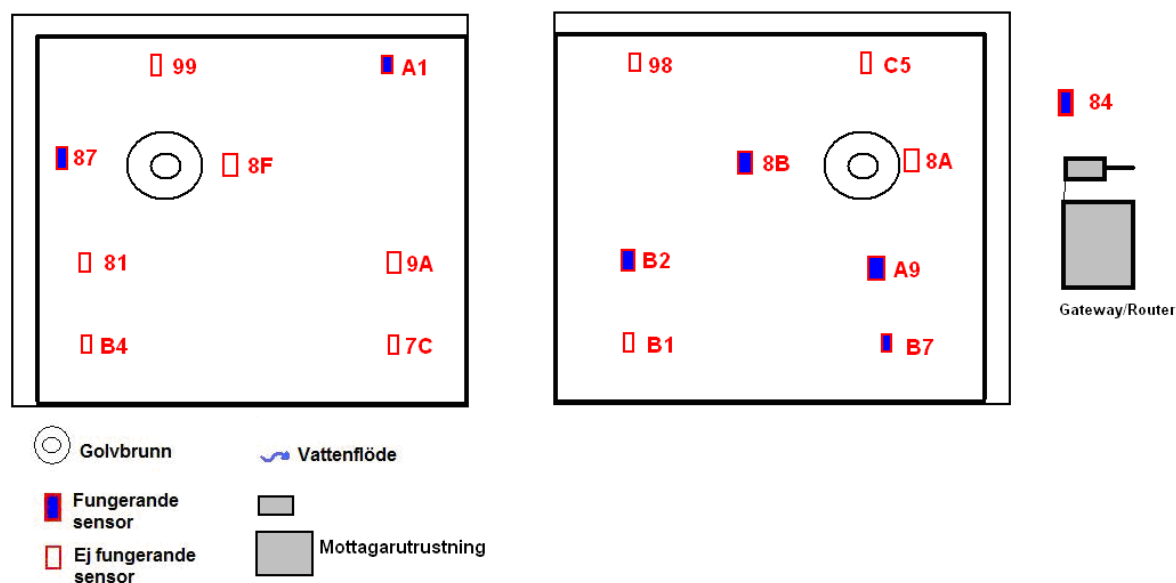
Figur 21. Transport af mock-ups på lastbil til Lund, august 2009.

5.3 Instrumenteringen i vægge og gulv

I alt 36 sensorer er placeret i de to mock-ups. Af disse er 17 sensorer indstøbt i gulvkonstruktionens betonplade, og ni sensorer er fræset ind i de tunge vægge. Yderligere ni sensorer er bygget ind i de lette vægge. Den endelige placering af samtlige sensorer fremgår af figur 27 og 28.

5.3.1 Montering af sensorer i Betongulve

Sensorerne er støbt ind i et betonlag med en tykkelse på 150 mm. Af de 17 sensorer i gulvet er batterierne løbet tør for strøm på de 10 inden selve forsøgene på laboratoriet i Lund er påbegyndt. Placeringen af de 17 sensorer i gulvene ses på figur 22.



Figur 22. Placeringen af de 17 sensorer i gulvene på de to mock-ups.

Yderligere er batterierne indenfor kort tid løbet tør for strøm på de resterende syv sensorer, der har været indstøbt i gulvkonstruktionerne. Det er efterfølgende besluttet at montere nye sensorer i betongulvene. De nye sensorer er monteret ved at bore betonkerner ud af betonpladen fra ydersiden af de to mock-ups. I de enkelte huller er en ny sensor skubbet ind i bunden af borehullet og efterfølgende fyldt ud med ekspanderet polystyrenskum (EPS) og forseglet med formskum. Arbejdsmetoden ses på figur 23 og 24. Den endelige placering af alle sensorer ses på figur 27 og 28.



Figur 23. Boring af hul til montering af ny sensor i betonplade i gulvkonstruktion.



Figur 24. Montering af ny sensor i betonplade i etagedæk og forsegling med formskum.

5.3.2 Lette vægge på stålregler

Efter at de lette vægge på skelet af stålregler er gjort færdige på den indvendige side mod baderummet, er vandet tilsluttet fra bagsiden af de to mock-ups, se figur 25. Derpå er mineraluldsisole- ring monteret mellem stålreglerne, hvorefter bagbeklædningen er fæstnet.



Figur 25. Placeringen af sensorer mellem stålreglerne i de lette vægge.

Batterierne på de fleste sensorer i de lette vægge er løbet tør for strøm indenfor kort tid. Det er efterfølgende besluttet at åbne vægelementerne udefra og skifte batterierne i de berørte sensorer. Sensorerne er efterfølgende placeret samme sted som oprindeligt. På samme måde er bagbeklædningen monteret og forsegllet og gamle skruehuller tætnet. Den endelige placering af sensorer ses på figur 27 og 28.

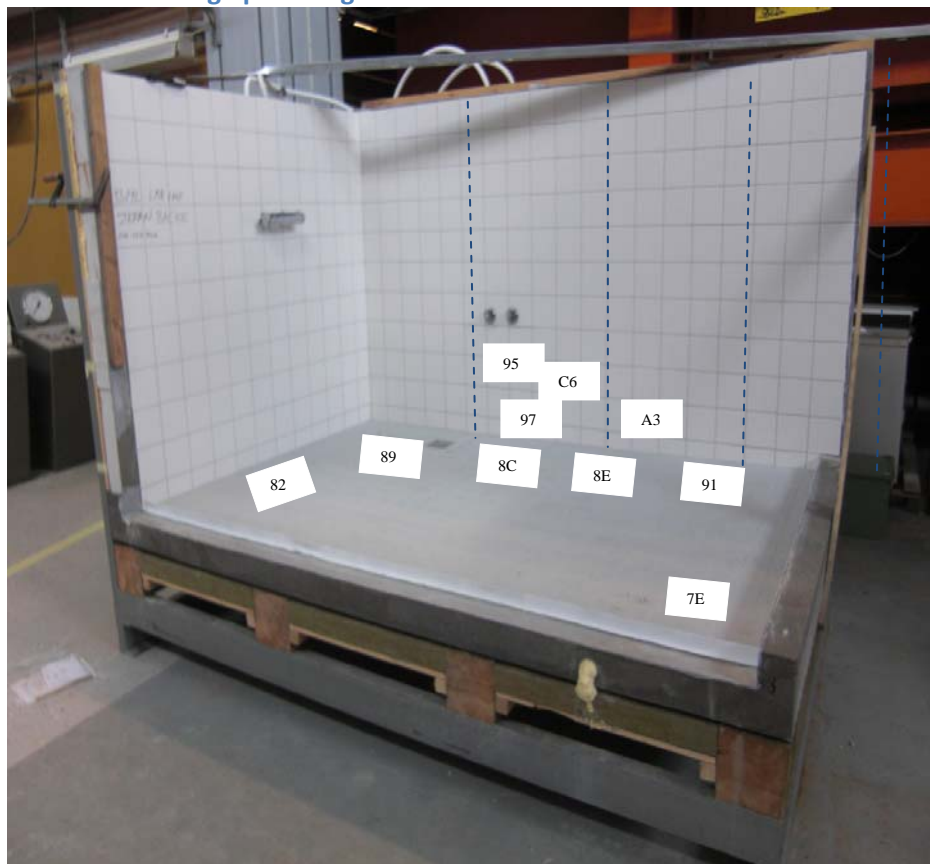
5.3.3 Tunge vægge

De tunge vægge er muret op før sensorerne er placeret. Fra den indvendige side mod vådrummet er der hugget ud til placering af de enkelte sensorer, se figur 26. Sensorerne er placeret i vægelementerne før end vådrumssikringen og flisebeklædningen er monteret. Sensorerne i de tunge vægge er løbet tør for strøm efter en tid. Ingen af sensorerne i de tunge vægge har efterfølgende fået skiftet batteri i forsøgsperioden.

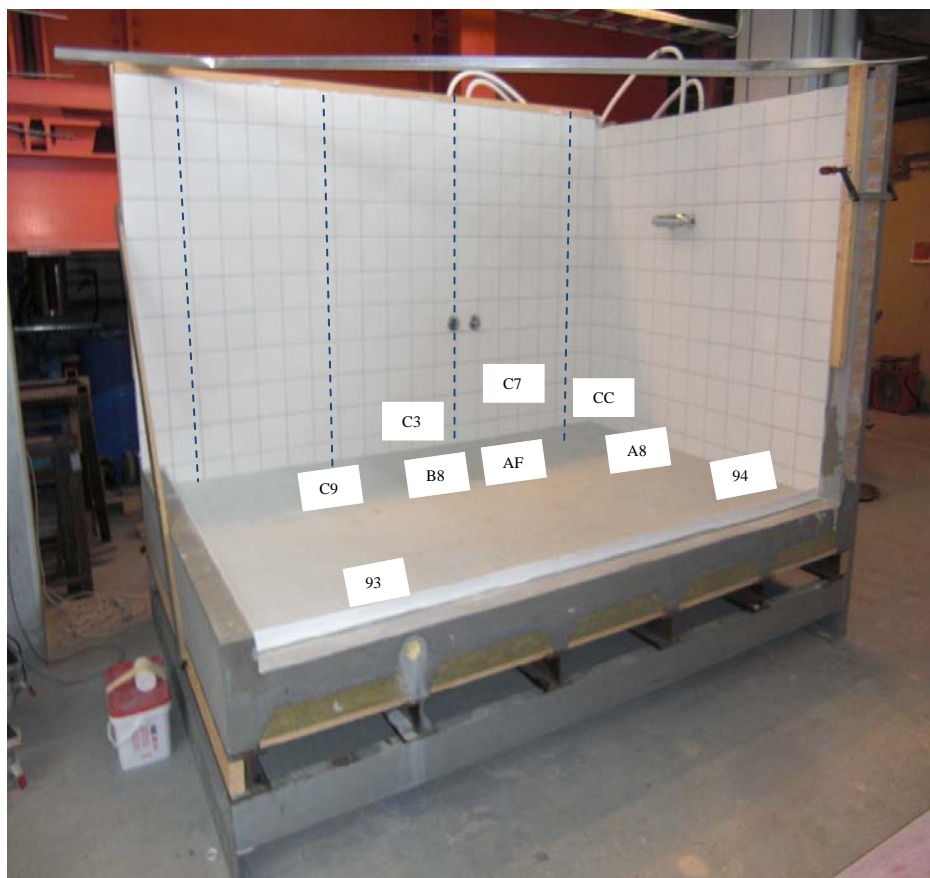


Figur 26. Placeringen af sensorer i den murede væg af letbeton.

5.3.4 Den endelige placering af sensorer.



Figur 27. Den venstre mock-up med angivelse af placering af samtlige indbyggede sensorer.

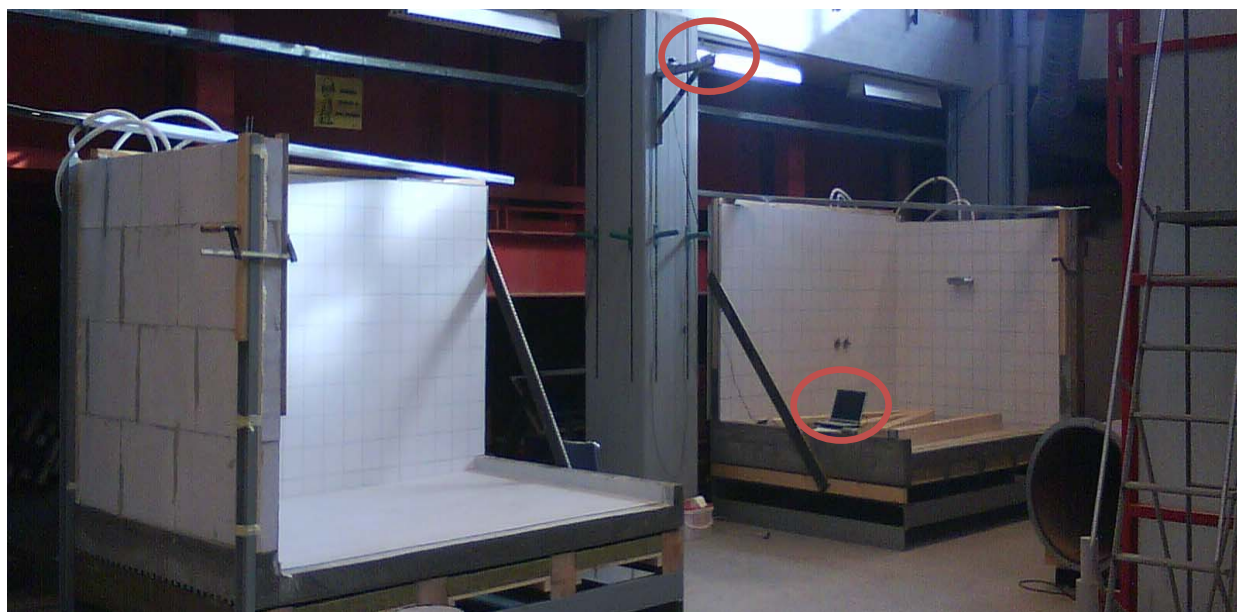


Figur 28. Den højre mock-up med angivelse af placering af samtlige indbyggede sensorer.

5.4 Dataoverførelse fra sensorer

Datamodtager og datasender (router) modtager signaler fra sensorer i de to mock-ups. Router er placeret midt mellem de to mock-ups cirka én meter over væggenes overkant. De indsamlede data overføres automatisk via en mobiltelefon-forbindelse til Teknologisk Institut i Danmark.

Under forsøgene er en computer tilsluttet via kabel til router for lokal opsamling af data, se figur 29.



Figur 29. Den højre mock-up med dataopsamlere markeret, router og computer.

5.4.1 Forsøgsbeskrivelse

To forsøgsserier er gennemført. I den første forsøgsserie er det undersøgt, hvordan sensorerne reagerer på påsprøjtning af vand. Forsøgene er gennemført på den venstre mock-up, der i dette forsøg er med intakt og tæt vådrumssikring og uden skader. Vandet er sprøjtet på som ved brug af baderummet til brusebad med en temperatur på ca. 53 °C tre gange på en uge. Hver påsprøjtning af vand har haft en varighed på 15 minutter og er gennemført ved, at en person manuelt har sprøjtet vand på indersiderne på en måde, som har svaret til, at der er taget et brusebad.

I det andet forsøg er der forud for selve påsprøjtningen af vand udført et antal huller i vandtætningen. Lækager er udført ved at bore 5 mm huller gennem flisebeklædningen og gennem vådrumsmembranen.

Lækager er udført på væggen i den venstre mock-up og i gulvet på den højre mock-up. Ved andet forsøg er de to mock-ups påsprøjtet med vand i 15 minutter fem dage i træk.

Forsøgene er beskrevet i detaljer i bilaget 'Rapport TVBM-5079'.

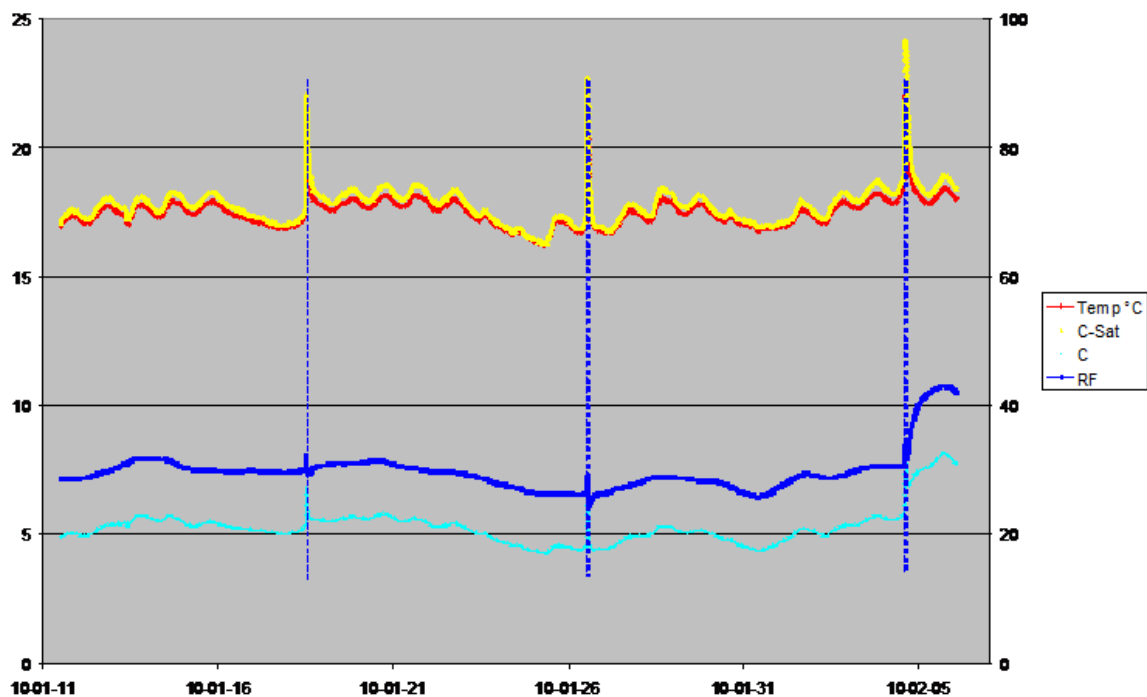
5.5 Data

Samtlige data kan ses i bilaget 'Rapport TVBM-5079'.

5.6 Data mønstre

5.6.1 Forsøg nr. 1, uden lækager

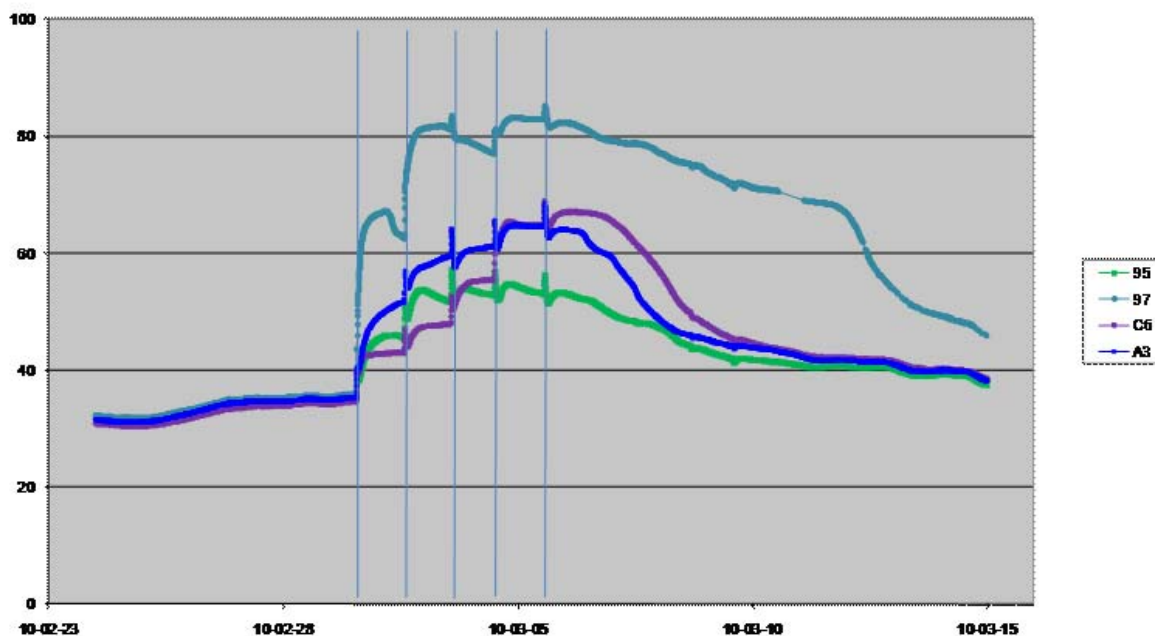
I den første forsøgsserie har sensorerne givet tydelige udslag af både temperatur og relativ fugtighed. Udslagene viser sig som momentane udslag, som efter påsprøjtning af vand vender tilbage til niveauet fra før påsprøjtningen, se figur 30.



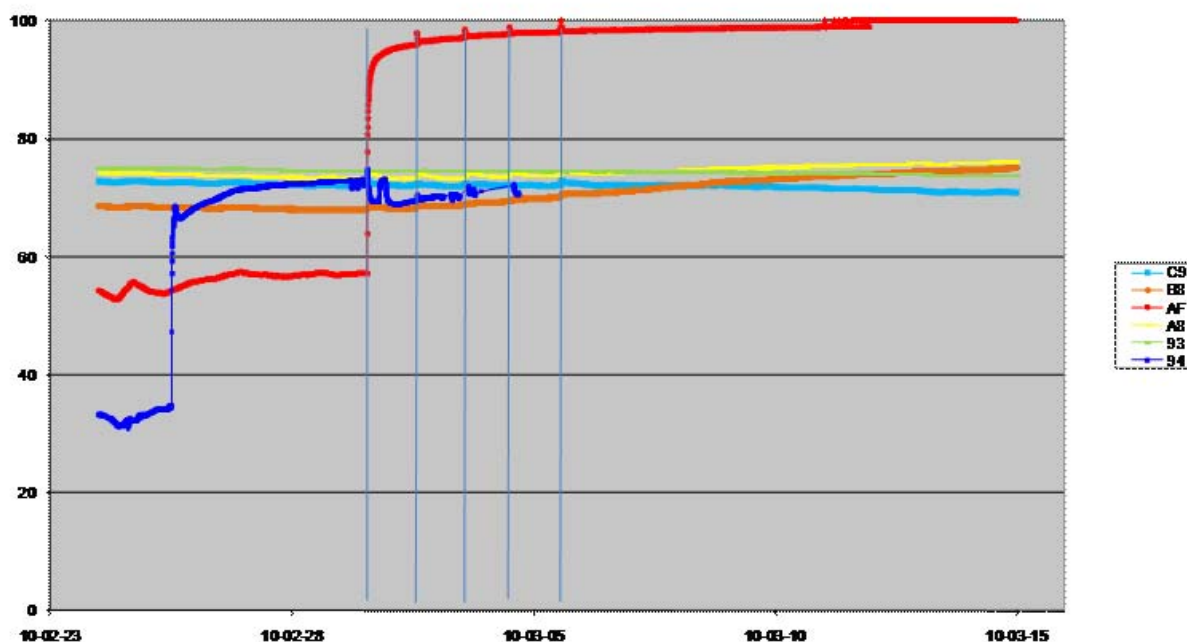
Figur 30. Forsøgsdate fra sensor nr. 95 monteret i let væg på den venstre mock-up.

5.6.2 Forsøg nr. 2, med lækager

I den anden forsøgsserie har sensorerne givet tydelige udslag i både temperatur og relativ fugtighed. Udslagene for den relative luftfugtighed viser sig som akkumulerende stigninger nær utæthederne i væggen på den venstre mock-up, se figur 31 og for gulvet i den højre mock-up, se figur 32.



Figur 31. Forsøgsresultater for den relative luftfugtighed, venstre mock-up, væg.



Figur 32. Forsøgsresultater for den relative luftfugtighed, højre mock-up, gulv.

5.7 Erfaringer og udfordringer med sensorer og trådløs kommunikation

Sensorene har vist sig at kunne give information om temperatur og relativ luftfugtighed i de undersøgte konstruktioner.

Forsøgene med de to mock-ups har været positive, selvom de anvendte prototyper af sensorer har vist sig at være behæftet med fejl og ulemper. Specielt med hensyn til batterilevetid, der har betydet, at alle de anvendte sensorer er udskiftet eller har fået skiftet batteriet.

Nogle sensorer er holdt op med at sende data allerede under indstøbningen, mens andre har været programmeret på en sådan måde, at de er løbet tør for batteri kort tid efter selve indstøbningen. Endnu andre igen er blevet skadet på en sådan måde, at de har vist 100 % relativ luftfugtighed i hele forsøgsperioden.

5.7.1 Sensorernes reaktioner

Sensorerne viser sig at give store udslag ved to forskellige situationer.

I det ene tilfælde er temperaturen steget med påsprøjtning af varmt vand. I det tilfælde har sensorerne registreret en momentan stigning i temperaturen og den relative luftfugtighed. Den momentane stigning er hurtigt faldet til et niveau som før påsprøjtningen af vand, efter at påsprøjtningen er afsluttet.

I tilfældet med et ødelagt tætningsplan viser sensorerne en akkumuleret stigning i den relative luftfugtighed, som øges med hver påsprøjtning af varmt vand.

5.7.2 Beslutningsstøttesystemer

Udfordringen for anvendelsen af data fra sensorerne i forbindelse med beslutningsstøttesystemer, der skal advare i forbindelse med fugtskader i baderum, er at skelne mellem data. Dataserier over kortere eller længere tid skal kunne genkendes, og der skal kunne skelnes mellem de to gennemførte forsøgssituationer. Dels i forbindelse med pludselige momentane ændringer af temperaturen og dels akkumulerede langvarige fugtophobninger, som er relateret til en fugtskade.

Processen med indsamling af data fra den centrale lagerenhed, hvor data fra sensorer lagres, til præsentationen af data på en grafisk fremstilling har i forsøgene været en tidskrævende proces. Den tidskrævende proces har indebåret indsamling af data fra sensorerne i det rette format og databearbejdning i programmet Excel, før en endelig tolkning har været mulig. For det færdige trådløse sensorsystem er det derfor vigtigt, at denne transition og præsentation af data foregår automatiseret og med en hastighed, som er i stand til at opfange og lokalisere en fugtskade i tide.

5.7.3 Sensorernes placering, lette vægge med stålregler

Forsøgene har vist, at de sensorer, der har været placeret i lette vægge af stålregler med isolering, bør placeres så lavt i væggen som muligt. De sensorer, der har været placeret lavest, har i forsøgene vist sig bedre til at være i stand til at registrere forandringerne, med opfugtning af konstruktionen, fra de etablerede lækager af fugtspærren end de sensorer, som har været placeret tættere på lækagen men højere oppe i vægskiven, se bilaget 'Rapport TVBM-5079'.

Forsøgene har også vist, at for lette vægge med stålregler er det muligt at opdage en fugtskade med en sensor placeret i nabofaget til den etablerede lækage. Dette menes at skyldes, at stålprofilerne, som er anvendt som regler, er perforerede. Gennem perforeringen kan fugten forplante sig til andre fag i konstruktionen. For at modtage den bedste information om vådrummembranens tæthed fra sensorerne er det tilstrækkeligt at placere en sensor i bunden af hvert tredje fag.

5.7.4 Sensorernes placering, betongulve

Forsøgene har vist, at sensorer lige ved siden af den etablerede lækage ved gulvafløbet giver den mest tydelige indikation på, at der er en lækage og mulig fugtskade under udvikling ved at registrere pludselige højere værdier af den relative luftfugtighed. Sensorer, der har været placeret i en afstand af ca. 0,6 meter fra den etablerede skade, har ligeledes registreret, at der er en lækage og mulighed for fugtskade. For sidstnævnte sensorer er fugtudviklingen dog foregået over en længere tidsperiode, og opdagelsen af lækagen og den mulige udvikling af fugtskaden har krævet en længe-

revarende overvågning. Sensorer med en afstand på mere end 0,8 til 1 meter af en lækage og mulig udvikling af en fugtskade har ikke vist sig at være i stand til at registrere fugtskaden i den tidsperiode, som forsøget er forløbet over.

6 Indeklimadata

Målinger af den relative luftfugtighed og temperatur i indeluften i de instrumenterede lejligheder på Tværvangen har været planlagt. Målingerne har været planlagt gennemført i beboede lejligheder. Målingerne har dog ikke ladet sig gennemføre i projektet.

Målingerne skulle have haft til formål at demonstrere datamåling, datatransmission, databehandling og anvendelsen af beslutningssystemet til sikring af et acceptabelt indeklima, der skulle præsenteres som en internetbaseret løsning, på baggrund af målte værdier for relativ luftfugtighed og temperatur i lejlighedernes rum og målte værdier for udendørstemperatur.

Ved at anvende den gennemførte termografering og sammenholde den med målte værdier for relativ luftfugtighed indendørs og temperatur inde og udendørs ville det have været muligt i praksis at demonstrere, hvordan et acceptabelt indeklima ville kunne sikres. Både med hensyn til risikoen for vækst af skimmelsvamp på kuldebroer i klimaskærmen og med hensyn til opretholdelse af komfortable niveauer for den relative luftfugtighed og temperatur inde i forhold til temperaturen udendørs.

Beslutningssystemet til sikring af acceptabelt indeklima er yderligere beskrevet i bilaget 'Beslutningsstøttesystem til sikring af acceptabelt indeklima', og i afsnit 7.2.3. Detaljer om termograferingen kan ses i bilaget 'Rapport 1118506_Tværvangen_MLH08_011'.

7 Beslutningsstøtte systemer

Beslutningsstøttesystemer er systemer, der gør en bygningsansvarlig i stand til at tage beslutninger på et så entydigt grundlag som muligt. Jo bedre grundlag, der er for at gennemføre en tilstandsvurdering og dermed vurdere omfanget af en aktivitet i forhold til tidsplaner i et byggeri eller i forhold til drift og vedligeholdelse, desto større effektivitet vil der kunne opnås.

Denne rapport er fokuseret på beslutningsstøttesystemer knyttet til drift og vedligehold. Sensortechnologien er vist anvendt i forhold til at opdage og lokalisere en skade, før den opstår, eller før den får en udbredelse med store konsekvenser. Derigennem er det muligt både at afværge skader, men også at gennemføre udbedringer med et større kendskab til arbejdets omfang, end det ellers ville være muligt.

7.1 Anvendelsen af beslutningsstøttesystemer

Beslutningsstøttesystemer kan ikke stå alene. Sensortechnologi og de tilknyttede beslutningsstøttesystemer skal ses som et supplement til den almindelige kvalificerede bygningsdrift. På nuværende tidspunkt består sensortechnologien af enheder, sensorer, med en fysisk størrelse og en begrænset levetid og rækkevidde. Disse faktorer stiller krav til planlægning og monitorering. For at kunne drage nytte af de informationer, som en sensor indhenter, skal informationerne kunne sendes, modtages, læses, behandles og omsættes til brugbar information for beslutningstageren. Brugere af sensortechnologi skal derfor være bekendt med teknologiens muligheder og begrænsninger. Specielt de fysiske begrænsninger for den indhentede information som for eksempel, hvor stort et fysisk område den indhentede information er repræsentativ for, og hvad den indhentede information betyder for de enkelte bygningskomponenter i konstruktionen. Placeringen af sensorer er derfor helt central for relevansen af den indhentede information. Desuden er det værktøj, som indsamler og

behandler data central. Data skal behandles i forhold til den problemstilling, som søges belyst – for nogle problemstillinger i forhold til tid og karakteren af historiske data.

7.2 Fire beslutningsstøttesystemer til brug og drift af bygninger

Fire centrale problemstillinger er beskrevet inden for opførelsen, drift og vedligehold af boliger og bygninger. Beskrivelserne tager udgangspunkt i de muligheder, der er for at anvende sensorteknologi til at afværge eller begrænse en skade. De beskrevne problemstillinger skal ses som få af mange anvendelsesmuligheder for sensorteknologi i byggeriet. De behandlede problemstillinger er:

- Beslutningsstøttesystemer relateret til vandforbrug
- Tilstandsvurdering af bygningskomponenter
- Beslutningsstøttesystem til sikring af acceptabelt indeklima
- Beslutningsstøttesystem for fugtovervågning af baderum i driftsfasen.

7.2.1 Beslutningsstøttesystemer relateret til vandforbrug

I boliger kan fugtproblemer, der er relateret til vandforbruget, afsløres inden, der opstår skade på boligens byggematerialer. Dette kan ske ved monitorering af vandforbrug. En monitorering som med fordel kan foretages hele døgnet. I etagebyggeri, hvor et forbrugsregnskab er lovpligtig, er det muligt at måle vandforbruget på de enkelte aftapningssteder i boligen.

For at kunne detektere vandspild kan trådløse sensorer monitorere boligens vandaftapningssteder samt hovedvandleddens indgang i den enkelte bolig. Sensorer kan placeres på mekaniske vandmålere for at måle forbruget på det enkelte aftapningssted samt hovedstikledningen til den enkelte bolig. Ved sammenligning mellem hovedstikledningen og de enkelte aftapningssteder er det muligt at afsløre et skjult brud.

Problemet med mekaniske målere er, at vandflowet skal have en bestemt størrelse, før hjulet i måleren drejer rundt. Så ved meget lille udsivning kan det være svært at detektere, om der faktisk er et vandspild.

Her kan måling af temperatur på vandrør støtte systemet. Disse temperaturfølere kan sidde i skjulte installationer og måle temperatur på vandrør og den omgivne luft. For at kunne benytte temperatur som en indikator for et uønsket vandflow må rumtemperaturen være tilstrækkeligt meget mindre end temperaturen for det varme vand og tilstrækkeligt meget større end temperaturen for det kolde vand. Beslutningssystemet tilknyttet vandflow er yderligere beskrevet i bilaget 'Beslutningsstøtte system for vandmåler'.

Case

Beslutningsstøttesystemet for vandmålere demonstreres i en case, som viser et vandforbrug over tre dage. Måledata sendes i casen hvert andet minut. Data summeres sammen til tre timers intervaller. Derved kan data analyseres og forbrugsmønstret identificeres.

7.2.2 Tilstandsvurdering af bygningskomponenter

En fugtophobning i bygningsdele kan medføre skade på bygningen og efterfølgende vækst af skimmelsvamp, som kan være sundhedsskadelig for brugerne. Beslutningsstøttesystemer kan på baggrund af målinger af henholdsvis temperatur og relativ luftfugtighed overvåge en fugtophobning i bygningsdele, således at en skade ikke medfører følgeskader eller udvikler sig til en større skade. Beslutningsstøttesystemet kan anvendes i opførelsesfasen til at styre og kontrollere fugtindholdet i beton og i driftsperioden til at give informationer om konstruktioners tilstand. Informationerne kan give en bygningsejer en bedre vurdering af, hvornår der skal ske reparationer. Informationer fra sensorer kan yderligere give et godt grundlag for beslutning om, hvornår et betongulv efter støb-

ning er tørt nok til, at den videre byggeproces med gulvbelægning kan påbegyndes. I det færdige byggeri vil bygherren kunne anvende resultater af målinger fra sensorer som slutdokumentation for byggefasen samt til at dokumentere overfor myndigheder, køber og forsikringselskab, hvor meget fugt, der er i et hus.

I den obligatoriske byggeskadeforsikring er fugt og skimmelsvamp en dækningsberettiget skade, hvis årsagen kan henføres til opførelsen af byggeriet. Derfor vil det være væsentligt for bygherren at kunne dokumentere aflevering af et byggeri uden et kritisk fugtindhold.

I forbindelse med drift af bygningen er det vigtigt at kunne måle en eventuel fugtophobning for at forebygge skader. Resultatet af målinger kan give et godt grundlag for at undersøge forholdene nærmere og afklare årsagen til den forøgede fugtmængde. Der kan være tale om for eksempel forkert brug af bygningen, kuldebroer eller lækage. Målinger kan anvendes som dokumentation overfor en eventuel lejer eller ejer. Installation af sensorer er interessante ved utilgængelige konstruktionsdele som for eksempel skjulte rør under gulve, i baderum og ved opvaskemaskiner. Beslutningssystemet tilknyttet tilstandsvurdering af bygningskomponenter er yderligere beskrevet i bilaget 'Tilstandsvurdering af bygningskomponenter'.

Case

Beslutningsstøttesystemet for tilstandsvurdering af bygningskomponenter demonstreres i en case, som viser fugtophobning i tagkassetter.

Placering af sensorer i konstruktioner, som ikke umiddelbart er tilgængelige, er interessante for at forebygge tagskader som følge af fugt. Der kan for eksempel være tale om:

- Fugt i spær og spærfødder i tagkonstruktioner
- Fugt i lukkede uventilerede tagkassetter
- Skader som følge af merisolering af tagrum
- Opfugtning af murkroner.

Netop fugt i uventilerede tagkassetter har givet anledning til store og omkostningsfulde udbedningsarbejder i det offentligt støttede byggeri, der er omfattet af Byggeskadefonden. Årsagen til disse skader har oftere været fugtig rumluft inde fra boligerne, der er trængt op i tagkassetterne og kondenseret, end det har været indtrængende regnvand. Uventilerede tagkassetter vil i første omgang være det mest oplagte mål for fugtmåling i byggerier.

Fugtophobning i tagkassetter i en bebyggelse på Sydsjælland betragtes, se figur 33. Den består af 72 boliger i et og to plan, der er sammenbygget som rækkehuse i syv blokke. Husene er udført med flade tage (hældning 1:40), der er opbygget af uventilerede, præfabrikerede tagkassetter af træ med tagpap og krydsfiner på oversiden samt fugtadaptiv dampspærre, spredt forskalling og gipsplade på undersiden.



Figur 33. Bebyggelsen før renoveringen.

Fugtphobningen er konstateret ved 5-årseftersyn, fordi nogle områder på tagene har givet efter, når man har gået på dem. Efter at have foretaget destruktive indgreb i tagkassetterne har det vist sig, at der har været forhøjet fugtindhold og råd i store områder, men ikke i hele konstruktionen, se figur 34.

Årsagen til fugtphobningen viste sig efter undersøgelser at være, at dele af tagfladerne ved ovenlysene ikke fik solindfald nok til, hvorfor den fugtadaptive dampspærre ikke kunne fungere efter hensigten, og at dampspærren generelt ikke har været udført korrekt ved ovenlys og lejlighedsskel.



Figur 34. Råd- og svampeskader i tagkassetter.

Tagene er i dag renoveret. Hvis der tidligere havde været foretaget målinger af fugtforholdene i tagkassetterne, ville skaderne formodentlig have været begrænset væsentligt.

7.2.3 Beslutningsstøttesystem til sikring af acceptabelt indeklima

Den relative luftfugtighed og temperatur i boligen, såvel rumtemperatur som overfladetemperaturer, har væsentlig betydning for bygningens indeklima. Kuldenedfald fra kolde overflader kan forringe komforten, fordi der kan opstå trækgener, fodkulde og kuldestråling fra kolde indvendige

overflader. Kuldebroer ses typisk omkring vinduer og døre samt ved hjørner og samlinger mellem vægge, gulv og loft, men også omkring andre gennembrydninger i klimaskærmen, for eksempel luftkanaler.

Da varm luft kan indeholde mere fugt end kold luft, vil varm fugtig indeluft, der passerer kolde overflader, afkøles, hvorved den relative fugtighed stiger. En høj relativ fugtighed kan give gode betingelser for skimmelsvampevækst og i værste tilfælde resultere i, at byggematerialer nedbrydes på grund af råd og svamp. Udeluftens indehold af vanddamp er lav om vinteren. Når den kolde luft føres ind i opvarmede rum, opvarmes den, og den relative luftfugtighed falder derfor kraftigt.

Ved at ventilere en bolig med udeluft er det derfor muligt at fjerne den fugt, der produceres i boligen, og holde den relative luftfugtighed nede. Imidlertid betyder ventilering samtidig et øget energiforbrug, da varmen fjernes fra boligen med den bortventilerede luft. Optimal ventilation kan på en energiøkonomisk måde opfylde menneskets hygiejniske og komfortmæssige behov for et acceptabelt indeklima med rumluft af acceptabel kvalitet.

Beslutningsstøttesystemet har på baggrund af målingerne således til formål at overvåge risikoen for vækst af skimmelsvamp inde i en bolig. Målinger af temperatur og den relative luftfugtighed inde og temperaturen udendørs kan således anvendes til at sikre og opretholde et sundt indeklima med, uden vækst af skimmelsvamp som indikator. Beslutningssystemet til sikring af et acceptabelt indeklima er yderligere beskrevet i bilaget 'Beslutningsstøttesystem til sikring af acceptabelt indeklima'.

Case

Beslutningsstøttesystemet til sikring af acceptabelt indeklima demonstreres i en case, hvor der anvendes termografering til lokalisering af kritisk kuldebro.

Da risikoen for skimmelsvampevækst er størst i områder med kuldebroer, skal disse lokaliseres. En metode til at lokalisere kuldebroer er at foretage en termografering af de indvendige overflader under vinterforhold. Ved termograferingen registreres de indvendige overfladers temperatur. Lokalt forekommende temperaturforskelle kan indikere, at der er tegn på enten kuldebroer eller indtrængning af kold luft. Indtrængning af kold luft kræver, at der er en trykforskel over klimaskærmen, vindpres på facaden eller et etableret undertryk indendørs. I projektet fokuseres på temperatur på indvendige overflader relateret til kuldebroer. Kuldebroer lokaliseres ved hjælp af termografering uden nævneværdig trykforskel over facaden.

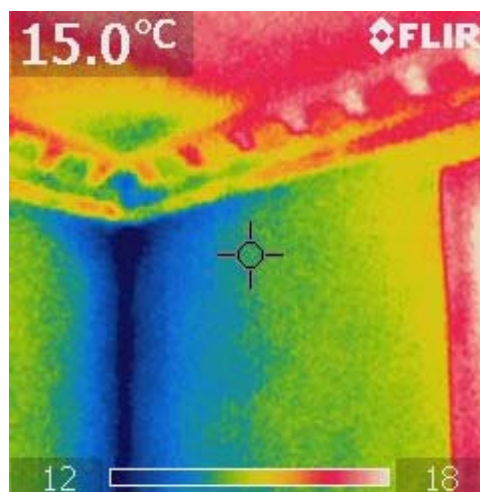
Termografering kan foretages indefra eller udefra. For billederne på figur 35 og 36 er termografien foretaget ved en udetemperatur på ca. -1 °C. Vejret har været stabilt med nogen sol i løbet af dagen og svag til let vind. Temperaturen inde er målt til ca. 20 °C.

På figur 36 er vist et eksempel på et område, hvor der er registret lokale temperaturforskelle. Temperaturforskellene forekommer i de digitale billeder som lokalt afgrænsede områder, og dets temperatur sættes i forhold til den pågældende vægs generelle temperatur. Figur 36 viser overgangen mellem lejlighedsskel, facade mod gade (væg til højre) og gavl (væg til venstre). Det vandrette lejlighedsskel er et traditionelt opbygget træbjælkelag med indskud og pudset loft. På det termografiske billede repræsenterer farven rød 18 °C og farven mørkeblå 12 °C. Hjørnesamling mellem gavl og facade giver traditionelt risiko for kuldebroer. Hvis der ikke gøres noget ekstraordinært for at isolere i hjørnet mellem facade og gavl, vil hjørnet være lidt koldere end de tilstødende vægflader, da netop hjørnet er påvirket af kulden fra to sider.

Da det viser sig, at der er en kuldebro, vil der være risiko for, at der kan dannes betingelser for vækst af skimmelsvamp, hvis den relative luftfugtighed bliver for høj i en længere periode.



Figur 35. Ejendom i København, facade mod gade. Gavlen er frilagt.



Figur 36. Overgang mellem lejlighedsskel, facade mod gade (til højre) og gavl (til venstre). Det vandrette lejlighedsskel er et traditionelt opbygget træbjælkelag med indskud og pudset loft. På det termografiske billede til højre repræsenterer farven rød 18 °C og farven mørkeblå 12 °C. Til venstre er vist et sædvanligt fotografi taget fra samme sted.

7.2.4 Beslutningsstøttesystem for fugtovervågning af baderum i driftsfasen

Fugtrelaterede skader i og på bygningskonstruktioner sker ofte med udspring i baderummet. Årsagen kan være indbyggede fejl (byggesjusk), slitage og forkert brug.

Eksempler på defekter: Forkert udførte samlinger af installationer, svigt i vådrumssikringen ved samlinger og gennembrydninger med videre.

Hvis fugttilstanden i konstruktioner omkring baderum kendes, kan følgeskader forhindres, da en tidlig alarm til rette vedkommende giver mulighed for at lokalisere og fjerne defekten. Det følgende er en gennemgang af umiddelbare udfordringer og beskrivelse af overvejelser, som skal gennemføres i forbindelse med udvikling af et beslutningsstøttesystem.

Et af de centrale aspekter i et funktionelt fugtovervågningssystem er omfanget af målepunkter og tolkning og præsentation af måledata.

Hvis en vilkårlig defekt skal detekteres umiddelbart efter, at den er opstået, vil det ofte kræve et stort antal installerede sensorer, hvilket ikke er ønskeligt af flere årsager, blandt andet sensorernes pris. Det kan derfor være interessant at tænke i alternative baner for at billiggøre et fugtovervågningssystem. En måde er at benytte såkaldte vikarierende størrelser. Det vil sige målinger af afledte fysiske tilstande. Eksempler på dette er måling af elektrisk modstand i rio-net eller at opsamle vand i særligt udvalgte punkter via væger eller opsamlingskar. En anden måde hvorved et system kan billiggøres er at forenkle de nuværende sensorer, så de eksempelvis kun afgiver et on/off-signal (fugt/ikke-fugt).

Ud over omfanget af målepunkter er tolkning og præsentation et centralt aspekt. Beslutningssystemet tilknyttet til fugtovervågning af baderum i driftsfasen er yderligere beskrevet i bilaget 'Beslutningsstøttesystem for driftsfasen af baderum'.

Case

Et beslutningsstøttesystem til sikring af baderum i driftsfasen indeholder eksempler på påvirkninger, der vil være med til at vanskeliggøre tolkning af måledata, og her skal forsøg med fuldska-modeller af badeværelserne være med til at kortlægge betydningen af påvirkninger og finde metoder til at gennemføre den mest enkle og korrekte tolkning af måledata. Den helt simple model med en fast grænse for kritisk fugtniveau vil sandsynligvis vise sig at være utilstrækkelig. Det kan vise sig, at det er mere hensigtsmæssigt at kigge på mønstre i fugt- og temperaturtilstanden. En siveskade ved gulvafløb har én type fugtprofil over tid, mens en gennembrudt fugtmembran ved brusenichen har en anden.

Ofte vil præsentation af samtlige måledata ikke være interessant for den almindelige bruger. Brugeren skal alarmeres, når en defekt opstår.

Casen beskriver nogle simple scenarier som:

- Årstidsvariation i relativ luftfugtighed.

Der vil være en naturlig variation i den målte relative luftfugtighed, som skyldes variation i den relative luftfugtighed i udeluften. Om vinteren vil der generelt være en tørrere luft i boligen, hvilket over tid vil resultere i en lavere relativ luftfugtighed i materialerne, der indgår i badeværelseskonstruktionerne, se figur 37. Konstruktionerne vil indstille sig i en fugtmæssig ligevægt med gennemsnitsfugtiveauet i badeværelset og tilstødende lokaler.



Figur 37. Baderum forberedt til støbning af betonplade i gulv.

- Temperatur-relateret variation i relativ luftfugtighed.

Der vil kunne opstå situationer, hvor temperaturen falder forholdsvis hurtigt i konstruktionerne. For eksempel hvis der bliver hældt meget koldt vand ud på betongulvet, eller koldt vand cirkuleres i rør, som køler omgivelserne ned, eller der bliver udluftet meget kraftigt med kold luft udefra.

- Fejlsignaler og svigt i sensorsystemet.

Det er forventeligt, at der til tider vil være fejlbehæftede signaler fra sensorerne, hvilket kan betyde, at en enkel måling kan indikere et meget højt eller meget lavt fugtniveau. Sådanne enkeltmålinger bør sorteres fra i analysen.

- Punktskade i rørinstallation eller vådrumsmembran.

En pludselig lækage i en rørinstallation eller i vådrumsmembran, se figur 38, kan betyde, at det omgivende materiale bliver opfugtet, dvs. at det suger vand til sig ved kapillarsugning. Samtidig kan der i visse tilfælde også ske en fordampning af vand fra materialet. Forholdet mellem vandtilgang fra lækagen, materialets kapillarsugningsevne og muligheden for fordampning bestemmer fugtens udbredelse i materialet.



Figur 38. Sensor placeret i umiddelbart nærhed af et afløb i gulv i baderum.

8 Cost-Benefit

Antallet af skadesager, hvor vand er den væsentligste skadevolder, er betydelige både i forsikrings-selskaberne og i byggeskadefondene. Der er derfor en stor interesse for mulighederne for at opda-ge fugtophobning og gribe ind med afværgeforanstaltninger, før skaderne udvikler sig yderligere. I den forbindelse er indbygning af fugtsensorer en mulighed, hvis det indbyggede sensorsystem er billigt nok i forhold til, hvor ofte skaderne opstår, og hvad udbedringsomkostningerne kan beløbe sig til. I det følgende gennemgås to eksempler fra Byggeskadefonden, hvor der ikke har været indbygget fugtsensorer, men hvor de kunne have gjort en forskel.

8.1 Uventilerede tage:

I en bebyggelse med 72 boliger fra 1997 er der ved 5-årseftersyn konstateret større fugtskader i tagene. Bebyggelsen er opført i to etager med flade tage, som er opbygget af uventilerede tagkassetter med gipslofter, fugtadaptiv dampspærre, isolering, krydsfinertagplader og to lag tagpap, se figur 39 og 40. På tagene er der til ovenlysene opbygget nogle større kasser, der kaster skygge på tagfladerne i større omfang. Skaderne er opdaget ved at tagene i store områder har givet efter, når der er gået på dem. Ved en nærmere undersøgelse, hvor der er udført huller flere steder i tagkassetterne, er der registeret et fugtindhold over det tilladelige niveau i de bærende dele af tagkassetterne. Krydsfinerpladerne og de bærende ribber har da også været angrebet af råd og svamp (Korkhat). De største skader er forekommet i skyggeområderne fra ovenlysene, men utætheder i dampspærren omkring disse har også været årsag til skaderne. Udbedringsarbejder har bestået i forstærkning af de bærende konstruktioner, opbygning af varmt tag omkring ovenlysene og montering af rytterlys i stedet for ovenlyskasser. Der har ikke været behov for genhusning af beboerne, mens arbejderne stod på.



Figur 39. Råd i de bærende ribber.



Figur 40. Opbygning af varmtag.

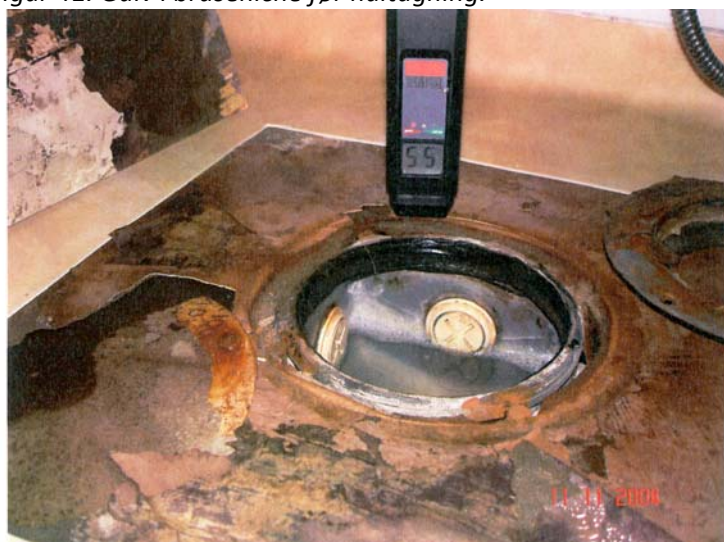
Udbedringsarbejder har kostet i alt næsten 17 mio. kr. inkl. honorarer til rådgivere, men ekskl. moms. Det siger sig selv, at det i den aktuelle sag ville have kunnet betale sig at indbygge fugtsensorer, så skaderne kunne have været opdaget tidligere og udbedringsomkostningerne være blevet minimeret. Byggeskadefonden har haft skader i uventilerede tagkonstruktioner i ca. 30 bebyggelser med i alt ca. 850 boliger, og udbedringerne har i alt kostet ca. 45 mio. kr. ekskl. moms. I alt er der ca. 43.500 boliger med uventilerede tagkonstruktioner under Byggeskadefonden. Det vil sige, at skaderne pr. bolig i gennemsnit har kostet ca. 1.000 kr. ekskl. moms at udbedre. Eller sagt med andre ord, ville man have kunnet investere op til 1.000 kr. plus moms. pr. bolig i fugtsensorer, hvis det helt ville have kunnet afværge skaderne. En ikke uvæsentlig sidegevinst ved indbygning af fugtsensorer kan være, at de også vil kunne registrere fugtindtrængning på grund af gamle og nedslidte tagbelægninger, og hvis udskiftning af tagpap af den grund kunne udsættes fra de forventelige 20 år til for eksempel 25 år, vil der være ca. 2.500 kr. ekskl. moms. pr. bolig at spare hvert 25. år. Her er det forudsat, at en bolig har en tagflade på ca. 50 m².

8.2 Lette badeværelser:

Denne bebyggelse er opført i 1989 og består af 32 boliger i én og halvanden etage, hvoraf de 18 har badeværelser på første sal. Gulve er opbygget på træbjælkelag med kileskårne strøer, spånplade og en belægning af svejst vinyl, se figur 41 og 42. I 2004 konstateres det, at gulve i brusenicher giver efter, og en destruktiv undersøgelse viser efterfølgende, at der er råd i spånplade og strøer. Årsagen er, at klemringe i gulvafløb ikke har været afpasset efter den aktuelle tykkelse på belægningen, så vand er trængt ned i de underliggende konstruktioner. Udbedringen har bestået i udskiftning af gulvopbygning, vinylbelægning og gulvafløb. Beboere har ikke været genhuset under udbedringsarbejderne.



Figur 41. Gulv i bruseniche før hultagning.



Figur 42. Høj fugtprocent måles i gulvpladen.

Udgifter til udbedringer har beløbet sig til i alt ca. 250.000 kr. inkl. honorarer, men ekskl. moms. Umiddelbart ville det også i denne sag have kunnet betale sig at have indbygget fugtsensorer, hvis skaderne så ville have været reduceret betydeligt. Byggeskadefonden har haft skader i gulve i badeværelser på lette etageadskillelser for i alt ca. 1,5 mio. kr. ekskl. moms., og da det vurderes, at der er ca. 6.400 boliger med badeværelser på lette etageadskillelser, beløber skaderne sig til i gennemsnit ca. 230 kr. ekskl. moms. pr. bolig af denne type. Det er relativt begrænset, hvad der kan indbygges af fugtsensorer for dette beløb, når der også skal afsættes midler til driften. I henhold til BUR's anvisning 'Planlægning af driftsvenligt byggeri' kan der forventes en levetid for pvc-gulve på 40 år. Hvis levetiden kan forlænges med for eksempel 10 år ved indbygning af fugtsensorer, vil der være en besparelse på ca. 2.500 kr. ekskl. moms. pr. bolig hvert 50. år. Det skal dog bemærkes, at gulvbelægninger i badeværelser ofte udskiftes hyppigere af æstetiske grunde.

Når overvejelser går på i hvilket omfang, der skal indbygges fugtsensorer eller andet, der kan indikere fugt i bygningskonstruktioner, skal det økonomiske tiltag afvejes med omfanget af de mulige

skader, men også med sandsynligheden for at skader opstår. I takt med at sensorsystemer bliver billigere, flytter tyngdepunktet i disse overvejelser sig til fordel for indbygning af sensorer.

9 Perspektivering

Efterspørgslen på driftsikre intelligente drifts- og overvågningssystemer til byggeriet er fortsat positiv ligesom drivkraften bag innovationen af løsninger. Udviklingsarbejdet er rettet mod indlejret, trådløs sensorteknologi og intelligente beslutningsstøtteværktøjer. Inden for de seneste år er systemerne blevet mere robuste, både hvad angår overførelse af data, rækkevidde, sendestyrke og selve indkapslingen. Sensorerne er blevet mindre og mere avancerede. Der arbejdes med at udvikle sensorer, som benytter batteri i den indledende fase og som efterfølgende kan initieres med et magnetfelt. Anvendelse af batteri i selve sensoren er fortsat en udfordring, da batterier i den nuværende form har en begrænset levetid. Et batteri aflader og mister evnen som energikilde. Af samme årsag udvikles der sideløbende tekniske løsninger, som gør det muligt at bringe energiforsyningen til en sensor til en position, hvor en udskiftning er mulig uden et destruktivt indgreb i selve konstruktionen. Disse tekniske løsninger arbejder med de problemstillinger, der er med at føre kabler med mindst mulig konsekvens for konstruktionen, således at kabelføringen ikke introducerer nedbrydningsmekanismer i konstruktionerne. De parallelt udviklede løsninger udvikles for at skabe her-og-nu-løsninger af den førende sensorteknologi. På produktudviklingssiden arbejdes der på at udvikle forretningskoncepter, der kan skabe synergi for sensorteknologi gennem byggeriets faser fra produkt, opførelse til drift og vedligeholdelse af en bygning for derved at skabe et større forretningsgrundlag for anvendelse af teknologien. Det må forventes, at sensorer, som indlejres i bygningskonstruktioner, ikke kan skiftes ud. Derfor er der mulighed for, at sensorer kan have forskellige formål gennem byggeriets levetid. Dette betyder, at den software, som er indlejret i sensorer, skal kunne udskiftes og tilpasses over mange årtier. Dette stiller særlige krav til softwareintegration med disse sensorer, da systemet skal være bagud-kompatibelt, og så simpelt at senere generationer af teknologien kan drage nytte af sensorerne.

Inden for byggeriet er der fortsat fokus på overvågning af fugt og temperatur i byggeriet via trådløse sensorer både under opførelse, i drift og vedligeholdelse. Det største potentiale ligger i fugt og temperaturstyring, og de største udfordringer ligger i indlejring af sensorer i beton og trådløs overførsel i konstruktioner med meget metal. Yderligere er der ved et komme en større interesse indenfor vedligeholdelse og dokumentation for, at en bygning er blevet holdt sund og forsvarlig. Interessen indenfor vedligeholdelse og dokumentation for en bygning kommer fra bygningsejerne og forsikringsselskaberne, som gennem sensorteknologien kan få et billede af bygningens tilstand og den foregående brug. Derved vil det være muligt at danne sig et billede af risikoen for skjulte fejl og mangler med konsekvens for bygningens bygningsfysiske forhold.

SensoByg-projektet har demonstreret overvågningssystemer med tilknyttede beslutningsstøttesystemer med netop bygningsejeren og forsikringsselskaberne som målgruppe. Gennem arbejdet har det vist sig, at der er interessefølgeskab til udvikling af intelligente og fuldt automatiserede sensorsystemer til overvågning af byggeri i alle faser, hvor bygninger, bygningsdele og konstruktioner selv giver signal om deres tilstand, men også hvornår det er klar til transport, indbygning, aptering m.m. i en fælles interesse om at minimere risiko for skader.

Udfordringerne i innovationen af sensorer med tilknyttede kommunikationssystemer og intelligente beslutningsstøtteværktøjer er fortsat de fysiske størrelser på de anvendte kommunikationssystemer og de tilknyttede energisystemer i form af antenner, frekvenser og rækkevidde samt batteri.

Udfordringerne skal ses i lyset af, at de største fysiske udfordringer ligger i indlejring af sensorer i beton og trådløs overførsel i konstruktioner med meget metal. En speciel udfordring er indkapsling i beton, hvor kravet er, at sensorers indkapsling skal være langstidsstabil i alkalisk miljø og kunne modstå mekaniske påvirkninger ved blanding, udstøbning og vibrering. Samtidig er det vigtigt, at indkapslingen tillader fugttransport mellem beton og sensor på en måde, så indsvingningstiden ikke bliver for lang, og således at den målte værdi kan relateres direkte til betonens fugtighed. Disse parametre gør, at der fortsat skal sættes fokus på at gøre sensorsystemer billige, robuste og langtidsholdbare også i forhold til at blive tilknyttet fremtidige systemer. Den sensoriske information skal kunne indgå i robuste netværk, og kommunikationen i systemerne skal være forenelige med krav til pris, robusthed, tilgængelighed og konstruktive forhold. Ligeledes skal slutbrugeren via for eksempel et beslutningsstøttesystem informeres om betydningen af den sensoriske information, og hvornår der i givet fald skal foretages handlinger.

10 Referencer

Andersen N. E., Christensen G., Nielsen F., "SBI-anvisning 178: Bygningers fugtisolering", Statens Byggeforskningsinstitut, (1993).

Brandt E., Nielsen T. B., Christensen G., Gudum C., Hansen M. Hjorslev, Møller, E. B., "SBI-anvisning 224: Fugt i bygninger", Statens Byggeforskningsinstitut-Aalborg Universitet, (2009).

DS/EN ISO 13788: Byggekomponenter og -elementers hygrotermiske ydeevne – Indvendig overfladedetemperatur for at undgå kritisk overflade- og mellemrumskondens – Beregningsmetode. 1. udgave 2001-10-09.

Hukka A., Viitanen H. A., "A mathematical model of mould growth on wooden material", Wood Science and Technology, 33, pp. 475-485, (1999).

Rasmussen T. V., Nicolajsen A., "SBI-anvisning 214: Klimaskærmens lufttæthed", Statens Byggeforskningsinstitut-Aalborg Universitet, (2007).

Bedri Sallova. Arber Sulejmani. LUNDS TEKNISKA HÖGSKOLA. FUKTCENTRUM VID LUNDS UNIVERSITET. Avd Byggnadsmaterial & FuktCentrum. **TVBM-5077**.

Examensarbete,

http://www.byggnadsmaterial.lth.se/fileadmin/byggnadsmaterial/Education/pdf_doc/TVBM-5077.pdf

Eric Goddard. LUNDS TEKNISKA HÖGSKOLA. FUKTCENTRUM VID LUNDS UNIVERSITET. Avd Byggnadsmaterial & FuktCentrum. **TVBM-5079**. Examensarbete,