



Monitering af broer med trådløse sensorer

SensoByg – D2



Rapport nr. : D2-1
Udarbejdet af : Erik Stoltzner (Vejdirektoratet), Peter H. Møller (Rambøll), Jesper stærke Clausen (Rambøll), Asger Knudsen (Rambøll)
Dato : November 2010

Forord

SensoByg innovationskonsortiet blev dannet i 2007. Formålet var at udvikle og demonstrere trådløse overvågningssystemer til brug i byggeriet samt i store konstruktioner så som broer, tunneler mv.

SensoByg blev støttet økonomisk af Forsknings- og Innovationsstyrelsen igennem perioden 2007-2010. Deltagerne i projektet fremgår af rapportens forside. Se også 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:

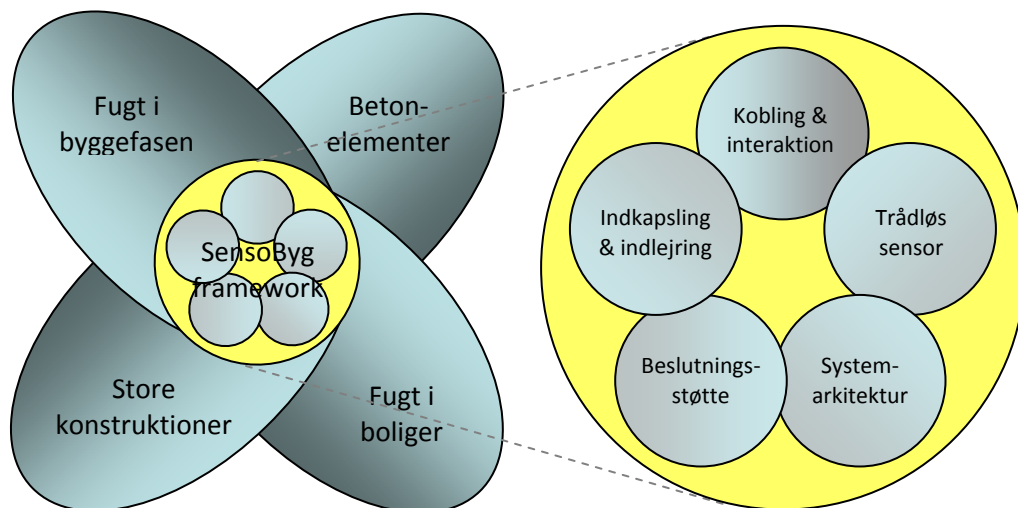
D1 – Fugt i boliger og byggeri (byggeriets driftsfase)

D2 – Store konstruktioner, herunder broer og tunneler samt store stålkonstruktioner

D3 – Betonelementproduktion

D4 – Fugt i byggefasen

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



Indholdsfortegnelse

1	Resumé	3
2	Indledning	4
3	Forventninger til sensorer/kravspecifikationer	5
3.1	Anvendelse på nye og eksisterende broer	5
3.2	Måling i udførelsesfasen	6
3.3	Måling i driftsfasen	7
3.4	Sensorer på eksisterende broer	7
3.5	Kravspecifikation, den semi-realistiske sensor	8
3.6	Kravspecifikation, den optimale sensor	9
4	Målinger på Vejdirektoratets broer og en på Færøerne	10
4.1	Motorvejsbro ved Hedehusene (motorvejsbro nr.??)	10
4.2	4 af Vejdirektoratets store broer og en almindelig motorvejs bro	15
4.3	Landsverkets største bro på Færøerne	20
5	Installationen af sensorer	22
5.1	Installationsprocedure for sensorer	22
5.2	Installation på broer i forbindelse med reparation	23
5.2.1	Bro ved Skovdiget	23
5.2.2	Bro UF af bane på Holbækmotorvejen	24
5.3	Installation under fugtisoleringen ved særeftersyn	25
5.3.1	Bro ved Borrevejle Vig	25
5.3.2	Fiskebækbroerne	26
5.3.3	Bispeengbuen	27
5.4	Driftssikkerhed af sensorer	27
6	Indsamling af data	30
7	Måleresultater	34
8	SMART-Monitoring – et vedligeholdssystem til infrastrukturanlæg	37
8.1	Generelt	37
8.2	Moniteringsmodul	37
9	Perspektiver og udviklingsmuligheder	39

Bilag 1: Data bilag, udskrift fra alle sensorer fra SMART

Bilag 2: Kravspecifikation til sensorer

Bilag 3: beskrivelse af SMART Monitoring System

1 Resumé

I rapporten gennemgås baggrunden for udviklingen af trådløse sensorer til overvågning af bl.a. fugt og temperatur i store konstruktioner som broer og tunneler samt de krav, som stilles til at sensorerne for at de kan anvendes på både nye og eksisterende broer.

Denne rapport opsummerer de erfaringer Rambøll har gjort med de trådløse sensorer på en række af Vejdirektoratets broer i perioden 2007 - 2010.

Mellem 2-8 sensorer er installeret på udvalgte store broer tilhørende Vejdirektoratet. Sensorerne er installeret i forbindelse med reparationer af broerne eller i forbindelse med særeftersyn. Der er afprøvet forskellige forsøg med indpakningen af sensorerne og den måde udstøbningen er udført på. Målinger er efterfølgende udført på sensorerne når det har været praktisk muligt for indsamling af data og overvågningen af sensorernes stabilitet og rækkevidde.

En del af projektet er at få sensorerne integreret i et overvågningssystem, så traditionel inspektion og vedligeholdelse kan optimeres og effektiviseres og overvågning kan udføres på sværttilgængelige konstruktioner. Dataindsamling og behandling af data fra sensorerne er derfor en væsentlig del af projektet og er integreret med det webbaserede forvaltningssystem, SMART Monitoring.

Udvalgte måledata er gennem gået og en samlet oversigt over alle de indstøbte sensorer og erfaringerne med stabiliteten og levetiden er gennemgået til sidste i rapporten.

2 Indledning

Formålet med udviklingen af trådløse sensorer til overvågning af fugt og temperatur i broer er, at få et integreret overvågningssystem, så traditionel inspektion og vedligeholdelse kan optimeres og effektiviseres. Nye sensorer til overvågning af drift af eksisterende og nye konstruktioner er blevet udviklet og afprøvet i laboratoriet hos Teknologisk Institut og installeret på udvalgte broer tilhørende Vejdirektoratet samt en enkelt stor bro for Landsverket på Færøerne. Sensorerne er blevet installeret i forbindelse med reparationer af brodæk, særeftersyn af fugtisoleringer eller særeftersyn af de bærende konstruktioner.

Dataindsamlingen fra disse sensorer er integreret med det webbaserede forvaltningssystem, SMART, udviklet af Rambøll, hvortil data sendes, registreres og behandles for de enkelte bygværker og prober.

Et centralt formål med disse sensorer er, at monitere tegn på fugt under en fugtisolering og dermed tegn på dårlig vedhæftning eller utætheder i en fugtisolering. Sandsynligheden for at brokonstruktionen udsættes for disse skader kan bedre forudsiges ved at overvåge parametre som temperatur og fugt umiddelbart under en fugtisolering.

En væsentlig del af SensoByg projektet er etablering af simple metoder til at udnytte målingerne fra sensorerne. Visionen er, at sensorerne bliver en integreret del af overvågningen af broerne tilstand. Sammenholdt med at måleforløbene forventes at forløbe over mange år og hver bro med fordel kan forsynes med en række sensorer, kan der være store fordele ved en automatiseret og systematisk nyttiggørelse af sensormålingerne. Sensormålingerne er lige som de traditionelle informationer (visuelle observationer, betonundersøgelser m.m.) baggrunden for beslutning af drifts- og vedligeholdelses tiltag på en bro.

Alle traditionelle informationer om en bro kan samles i et centralt forvaltningssystem, og ved at integrere sensormålingerne til dette system, kan alle observationer for en bro vurderes på én gang. Hvis systemet omfatter alle broerne kan sensormålingerne dermed også indgå i en overordnet prioritering af drifts og vedligeholdelsesaktiviteterne på tværs af broerne.

For at optimere anvendelsen af sensormålinger forventes der opbygget et overordnet system der sikrer at:

- Rå måledata overføres automatisk til den centrale internetserver eller med håndholdte systemer fra mindre broer.
- I broforvaltningssystemet indlægges sensorernes placering under de eksisterende konstruktionselementer.
- I broforvaltningssystemet hentes data fra den centrale server.
- I broforvaltningssystemet foretages en automatiseret tolkning af måleresultaterne.
- I broforvaltningssystemet anvendes de tolkede resultater sammen med øvrige observationer fra hvert konstruktionselement til en vurdering af udbedringsbehovet.

Et af de overordnede formål med beslutningsstøttesystemet er at al normal indhentning og vurdering af data kan udføres af det personale der forestår den øvrige drifts- og vedligeholdelse af broerne, således at sensormålingerne kun i undtagelsestilfælde kræver vurdering af specialister.

Denne rapport er udarbejdet under D2 (store konstruktioner). Gruppen har haft følgende deltagere:

- Rambøll Danmark A/S (Projektleder)
- Vejdirektoratet
- Femern Bælt
- Teknologisk Institut
- Tempres
- Grønvold & Karnov

3 Forventninger til sensorer/kravspecifikationer

Det forventes at sensorerne hovedsageligt skal bruges på udvalgte konstruktionsdele af broer og anlægskonstruktioner som f.eks. broplader, søjler og kantbjælker. Det forventes at sensorer med fordel kan bruges under følgende forhold:

Under fugtisoleringen:

- Nye konstruktioner og omisoleringer.
- Partiel udskiftning.
- Under eksisterende fugtisoleringer.

Indstøbt i beton:

- Nye konstruktioner
- Reparation af eksisterende konstruktioner

Kravene til selve sensorerne generelt er bl.a.:

- Relativ lang levetid af batteri på 5-10 år på kort sigt og i hele broens levetid på lang sigt.
- Entydig identifikation af de enkelte sensorer så databehandling bliver nem og sikker.
- Rækkevidde på minimum 5-10 m så aflæsning af data kan klares uden afspærring af veje.
- Nem og sikker monteringsmetode .

3.1 Anvendelse på nye og eksisterende broer

Formålet med sensorerne er, at de både kan anvendes på nye og på eksisterende konstruktioner. For begge disse konstruktionstyper er der her behandlet tre hovedområder:

1. Sensoren lægges ned i betonblanderen og følger uden styring med betonblandingen
2. Sensoren placeres på præcist udvalgte dele af konstruktionen, typisk i armeringens dækklag ud mod en overflade der er udsat for aggressiv miljøpåvirkning. Sensoren overvåger udviklingen af betonens egenskaber, primært temperatur og fugtindhold.
3. Sensoren er placeret umiddelbart under fugtisolering, og det kontrolleres om der er fugtigt eller frit vand under fugtisoleringen.

For en del af kravene til sensorerne har det kun lille betydning, om de skal anvendes på nye eller eksisterende konstruktioner, hvor levetiden af sensoren skal være 10 år vs. 50-100 år. For en del af kravene er det af stor betydning, om sensorerne skal anvendes under fugtisolering eller indstøbes i beton. I det efterfølgende er kravene til sensorerne opdelt efter hvilke anvendelser de refererer til.

I udførelsesfasen kan sensoren anvendes ved at placere sensoren i den nystøbte beton: herved kan udtørnings/hærdeforløbet registreres og anvendes til en mere præcis angivelse af det tidligste tidspunkt for udlægning af den epoxygrunder, som normalt udlægges før det egentlige fugtisoleringsarbejde påbegyndes.

Sensoren kan endvidere anvendes i forbindelse med fugtmålinger under fugtisoleringen til at afsløre utætheder og andre fejl inden fugtisoleringen skjules af diverse lag af belægninger, konstruktioner m.m. Derved lettes udbedring, og risikoen for skjulte skader mindskes.

3.2 Måling i udførelsesfasen.

Formålet med måling i udførelsesfasen vil typisk være, at kontrollere om den nyudstøbte beton udvikler egenskaber (styrke tæthed m.m.) som forventet. Udførelsesfasen vil typisk vare frem til afleveringen og senest frem til afslutning af den udførendes 5-årige garantiperiode, altså maksimalt ca. 5 år, men den største betydning vil normalt være indenfor det første år efter monteringen.

En helt særlig anvendelse vil dog være under selve betonproduktionen: tilsætning af delmaterialer, blanding, transport, udstøbning og vibrering. Denne periode varer kun ca. 4 timer. Sandsynligvis er det en online registrering af de første 1-3 timer frem til lige før betonen anbringes i formen, der rummer det største potentiale, idet grove fejl ved en betonleverance kan rettes uden større problemer for udførelsen. I denne første fase kan det blot undlades at anbringe den fejlbehæftede beton i formen. Trådløse sensorer vil medføre en unik mulighed for en sådan overvågning af betonfremstillingen.

Se i øvrigt

3.3 Måling i driftsfasen.

Formålet med måling i driftsfasen og garantiperioden er typisk, at kontrollere om der opstår forhold (typisk indtrængning af vand og/eller klorider) som kan medføre væsentlig nedbrydning af konstruktionen. Driftsfasen vil være op mod 100 år, men ved indbygning i eksisterende konstruktioner eller ved indbygning i forbindelse med reparationer kan måleperioder på ned til 5-10 år være relevante.

I driftsfasen kan sensoren anvendes til at angive det optimale tidspunkt for udskiftning af fugtisolering, dvs. så sent som muligt inden dyre følgeskader opstår. Derved mindskes risikoen for skjulte skader samtidig med at unødvendig udskiftning af fugtisoleringer undgås. Se Figur 1.



Figur 1. Foto til venstre, normalt område, betonoverfladen er tør og fugtisoleringen har fuld vedhæftning. Foto til højre, meget skadet område: frit vand under fugtisoleringen, og fugtisoleringen hæfter ikke.

Formålet med indstøbte sensorer er typisk at måle hvor hurtigt aggressive stoffer (fugt og klorid) trænger gennem betonens dæklag ind til armeringen. Ved indstøbning i frisk beton er det vigtigt, at kende sensorens præcise afstand til den alvorligt eksponerede betonoverflade. Typisk placeres sensoren derfor i en nøje fastlangt position i formen, hvorefter betonen udstøbes. Afstanden til den eksponerede overflade er typisk mellem 10 og 75 mm.

Mere specifikke krav til sensorerne er nærmere beskrevet i afsnit 3.5 og 3.6 og i bilag 2..

3.4 Sensorer på eksisterende broer

Hovedanvendelsen vil være på eksisterende broer, hvor det forventes at fugtisoleringen skal skiftes indenfor de næste 10-20 år. Dette medfører så, at det er vigtigt, at der findes en sikker og nem metode til eftermontering af sensoren.

Det må påregnes at sensoren skal fungere i min. 10-20 år (gerne 50 år). Det skal være muligt at føre en aflæsningsenhed direkte hen over eller nær sensoren, normalt er der ikke jern over sensoren. Kravene til målenøjagtighed og tolkning er små, idet sensoren blot skal angive en helt grov ja-/nej-registrering af fugtmætning under fugtisoleringen.

En typisk anvendelse vil omfatte måling 1-2 gange hvert år over en lang årrække. Vurderingen af resultaterne skal derfor være simpel, f.eks. overførelse til broens normale forvaltningssystem, som f.eks. SMART-Monitoring eller lignende, hvor data vurderes på lige fod med de øvrige inspektionsresultater for bygværket.

3.5 Kravspecifikation, den semi-realistiske sensor

Egenskab	Under fugtisolering		Indstøbt i beton	
	Udførelse	Drift	Udførelse	Drift
Hvilke dele af konstruktionen	Bro- og P-dæk, tunneler		Udsatte og vanskeligt tilgængelige betonoverflader: uisolerede brodæk, søjler, tunneler + statisk vigtige områder (produktion og udførelse)	
Levetid	2 uger (optimalt 5 år)	50 år, evt. 10-20 år ved eftermontering	4 uger (optimalt 5 år)	100 år, evt. 25-50 år ved eftermontering
Hvor placeres sensorer	På betonoverflade direkte under fugtisolering		I dæklag over armering, for udførelse evt. også dybt inde i konstruktionen	
Metal i konstruktionen	Armeringsnet under sensoren, men kun sjældent over sensoren		Sjældent over sensoren, men aftastning kan kræve måling gennem 1 m armeret beton.	
Sensor egen id	Helst, men ikke ubetinget nødvendigt		Nødvendigt	
Sensor størrelse	Ca. 5x5cm, tykkelse <3 mm evt. 2 cm		1x3x5 cm indstøbt. Eftermonteret, Ø 10mm (evt. Ø30 mm)	
Robusthed	Temp. 160 °C + last fra asfaltmateriel		Vibration og påvirkning ved støbning Produktion: I blandemaskine	
Alkalibestandighed	Høj bestandighed		Ekstrem høj bestandighed, pH = 13	
Antal	5-10 for små konstruktioner. Mange flere ved store konstruktioner		5-10 for små konstruktioner. Mange flere ved store konstruktioner	
Eftermontering	-	Meget stor betydning	-	Væsentlig, betydning
Ekstern strøm	Giver fordele (simpel dataopsamling), men er næppe et krav		Store fordele (simpel dataopsamling og bedre målinger), men muligvis ikke et krav	
Rækkevidde	Min 30 cm, optimalt 50-100 m		Min. 20 cm, bedre 1m, optimalt 100m	
Tid for ligevægt	10 min	1 uge	10 min	1 uge
Aflæsning	1 min	Max. 5 min,	Max 5 min.	Max 1 min.
Måleusikkerhed	Fugtmætning ja/nej		Præcis måling max. + 0,5 %	
Betydning af pris	Pris er væsentlig, alternativ kablede sensorer Optimalt: sensor < 100 kr./stk. Eftermonteret: Sensor <1000 kr./stk.		Pris er væsentlig, alternativ: kablede sensorer Optimalt: sensor < 200 kr./stk. Eftermonteret: sensor < 500 kr./stk.	
Behov for tolkningsværktøj	Meget lille behov for nyudvikling		Kræver væsentlig nyudvikling	Kræver nogen nyudvikling
Bruger af software	Entreprenøregnet	Ikke-eksperter	Entreprenøregnet	Ikke-eksperter

3.6 Kravspecifikation, den optimale sensor

Egenskab	Under fugtisolering		Indstøbt	
	Udførelse	Drift	Udførelse (produktion)	Drift
Hvilke dele af konstruktionen	Hele konstruktionen, men især: Overflader mod aggressivt miljø (søjler, bro- og P-dæk m.m.) Styrkemæssigt hårdt belastede områder (vederlag, søjler m.m.) Områder beskyttet af Fugtisoleringer m.m. (bro- og P-dæk m.m.)			
Levetid	Længere end konstruktionens levetid (min.150 år)			
Hvor placeres sensorer	Hovedanvendelser: På betonoverflade direkte under fugtisolering I dæklag over armering (med præcis valgt afstand til betonoverfladen) I betonvolumen dybt inde i konstruktionen			
Metal i konstruktionen	Armeringsnet både under og over sensoren.			
Sensor egen id	Nødvendigt			
Sensor placering	Sensoren kan selv angive sin placering indenfor få cm, i dæklag skal afstanden til overfladen dog angives indenfor 1 mm.			
Sensor størrelse	Så lille som mulig. I dæklag og under fugtisolering max tykkelse 1 mm. I øvrige anvendelser kugle mindre end ca. 1cm			
Robusthed	Forhold i blandemaskine Vibration og påvirkning ved støbning Temp. 160 °C + last fra asfalmateriel (anvendelse under fugtisolering)			
Alkalibestandighed	Ekstrem høj bestandighed, pH = 13			
Antal	50-100 stk. i små konstruktioner. Mange flere ved store konstruktioner			
Eftermontering	Væsentlig betydning			
Ekstern strøm	Nej, sensoren skal være selvforsynende			
Rækkevidde	Direkte dataoverførsel til mobilnet			
Tid for ligevægt	Ca. 10 min. Dog meget kortere ved eventuel måling af acceleration			
Yderligere måleparametre	Måling af acceleration, samt evt. måling af kloridindhold og korrosionshastighed.			
Måleusikkerhed	Fugt + 0,5 % RH, temperatur + 0,1 °C			
Betydning af pris	Pris (dvs. omkostninger til: sensor, montering, dataindsamling og –tolkning) er altafgørende for anvendelsen. Sensorpris < 10 kr., anbringelse ved at kaste sensoren i betonen eller under fugtisoleringen. Automatiseret dataindsamling, og automatiseret grovtolkning af data, inkl. afsendelse af alarmmeldinger. Hovedparten af data-tolkning sker ved aflæsning af alarmmeldinger			
Behov for dataopsamlingsværktøj	Etablering af automatiseret dataopsamling afgørende for anvendelse af et stort antal sensorer. Data skal overføres direkte til programmer, der anvendes ved den almindelige forvaltning af drift og vedligehold af konstruktionen.			
Behov for tolkningsværktøj	Behov for udvikling af tolkningsalgoritmer Behov for udvikling af automatiseret tolkning, inkl. alarmmelding			
Bruger af software	Software skal kunne benyttes af konstruktionens almindelige driftspersonale			

4 Målinger på Vejdirektoratets broer og en på Færøerne

4.1 Motorvejsbro ved Hedehusene (motorvejsbro nr.??)

I løbet af sommeren 2007 blev de første indledende undersøgelser med sensorer udført på en bro. Sensorerne blev installeret i forbindelse med et reparationsprojekt af en motorvejsbro under ledelse af Rambøll. Reparationen var typisk for danske betonbroer, hvor den vandtætte fugtisolering under en asfaltbelægning erfaringsmæssigt begynder at blive nedbrudt/utæt efter ca. 40 års levetid, se Figur 2.



Figur 2. Reparation af brodæk. Halvdelen af brodækket er afspærret imens den repareres.

Formålet med at installere sensorerne var, at registrere tætheden af den nye fugtisolering, som beskytter broens betonkonstruktion mod nedbrydning fra det aggressive saltholdige vand fra vejbanen. For den aktuelle bro var det af stor betydning, at eventuelle utætheder i fugtisoleringen hurtigt blev opdaget, idet en væsentlig del af broens bæreevne afhænger af korrosionsfølsomme spændkabler.

De eksisterende metoder til at detektere utætheder, baseret på destruktive ophugninger, gør en løbende vurdering af fugtisoleringens tæthed så kostbar og usikker at fugtisoleringen næsten altid skiftes ud fra en erfaringsmæssig vurdering af fugtisoleringens levetid.

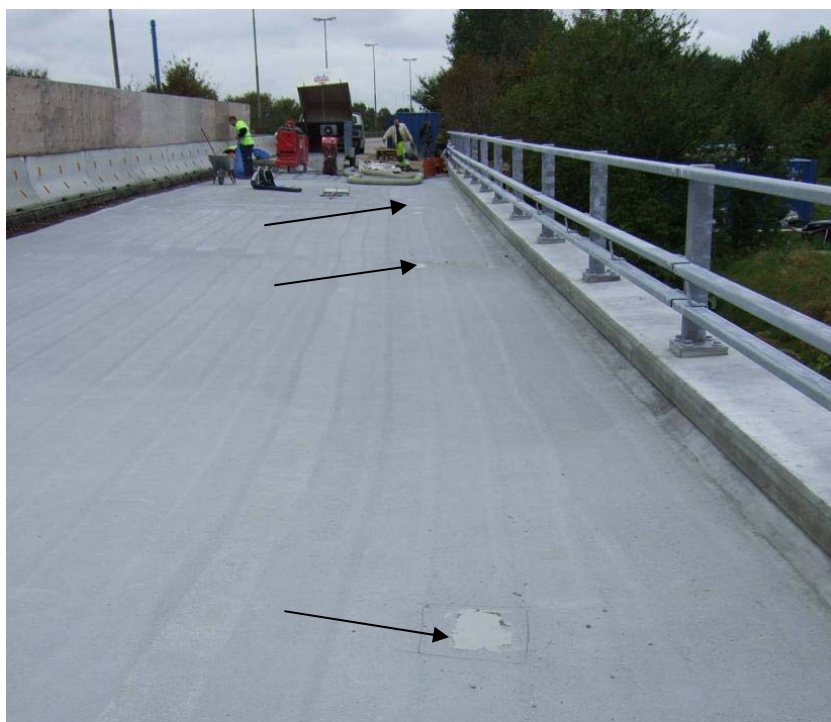
Den erfaringsmæssige vurdering er dog behæftet med en del usikkerheder, hvilket i enkelte tilfælde har betydet at fugtisoleringen er skiftet så sent, at der er opstået kostbare skader på betonkonstruktionen. I de fleste tilfælde bemærkes, i forbindelse med udskiftningen, at fugtisoleringen er skiftet før levetiden er opbrugt for fugtisoleringen alene. Det kostbart at skifte en sådan fugtisolering, hvor entreprenørudgifterne ligger på ca. 2.500-3.500 kr/m² og en reparation medfører også store trafikantgener. Formålet med de monterede sensorer er derfor, at forbedre detekteringen af utætheder i fugtisoleringen, så fugtisoleringens levetid bedre kan udnyttes fuldt ud samtidig med, at der er mindre risiko for skjulte skader udvikles uden at blive identificeret.

I forsøget anvendtes en batteridrevet trådløs temperatur- og fugtsensor, hvor fugtsensoren er af den kapacitative type. For at opnå en forventelig levetid på min. 10 år er sensoren forsynet med ekstrabatterier. Sensorerne blev anbragt i en udsparring i konstruktionsbetonen, og i tilfældet af at der løber vand under fugtisoleringen, vil hullet fyldes med vand, hvilket så registreres af sensoren. Se Figur 3. Over sensoren monteres en 6 mm teflonplade som efterfølgende udspartles. Derved undgås at grundingsepoxy trænger ned til sensoren og opvarmningen fra den efterfølgende påbrænding af fugtisoleringen reduceres. Den samlede belægning består af: Epoxygrunder, 2 x 5 mm fugtisolering, 20 mm drænasfalt og ca. 70 mm asfaltbelægning.



Figur 3. Batteri (venstre) og sensor (højre) placeret i udsparring

Der blev indstøbt 5 sensorer, placeret i dækkets dybdelinje, hvor risikoen for utætheder erfaringsmæssigt er størst. Se Figur 4.



Figur 4. Række af sensorer placeret i dybdelinje.

Sensorerne sendte måleresultater til en transmitterboks placeret for enden af broen i en afstand på mellem 10 - 30 m fra sensorerne. Fra transmitterboksen videresendtes signalerne via et GSM modem til en internetserver hos Teknologisk institut. Transmitterboksen var solcelledrevet med genopladeligt batteri når solen ikke skinnede. Med solcelledriften kunne en kostbar tilslutning af boksen til strømnettet undgås, hvilket halverede omkostningerne til transmitterboksen. Transmitterboksen kan genbruges og evt. flyttes for at få længere måleserier på de enkelte broer. Se Figur 5 og Figur 6.



Figur 5. Transmitterboks (forgrunden) med antenne pegende mod brodæk

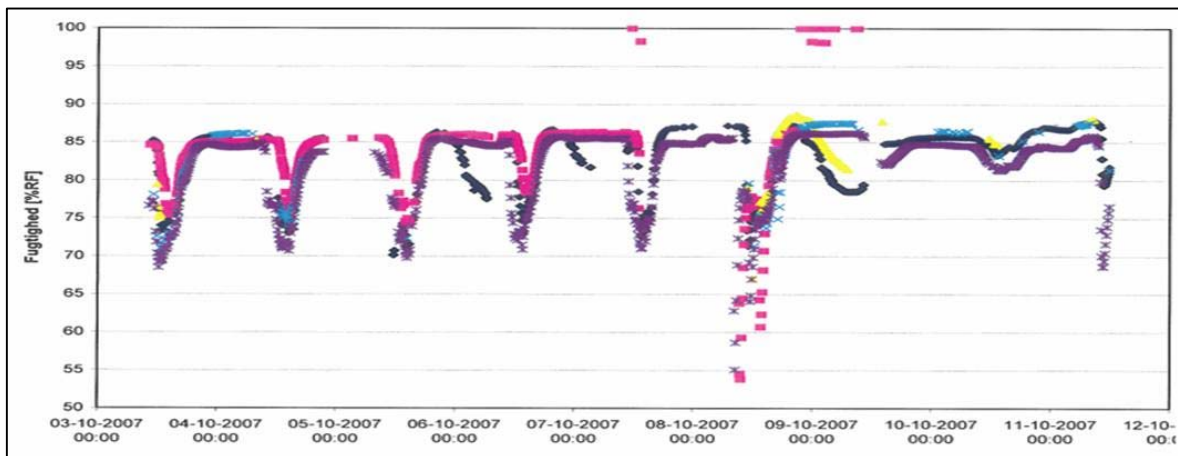


Figur 6. Transmitterboks

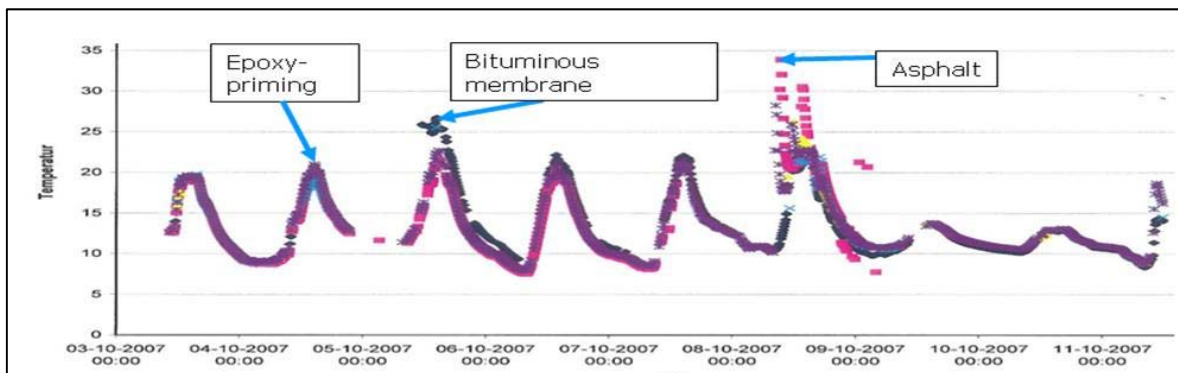
Erfaringen efter 3½ måneds drift kan kort opsummeres som følger:

- Sensoren kan relativt simpelt beskyttes mod mekaniske og varmepåvirkninger fra fastbrænding af fugtisolering, udlægning af varm asfalt samt opløsningsmidler fra udlægning af epoxy.
- Løbende modtages signaler fra alle sensorer, men især for de sensorer placeret længst væk fra transmitterboksen optræder der jævnligt problemer med signaltransmissionen. Det blev derfor planlagt at flytte antennen tættere på sensorerne.
- Strømforsyning med solceller (som forsyner datalogger men ikke sensorer) fungerer fint, selv i den mørkeste vintertid.
- Måleresultaterne svarer til forventningerne når der ikke er utætheder i fugtisoleringen.
- I perioder stiger fugtigheden til over 90 % RH, hvilket den anvendte kapacitative fugttransducer ikke er egnet til at måle.

På Figur 7 og Figur 8 vises målingerne fra de første dage grafisk.



Figur 7. Fugtmålinger i de første dage efter montering af sensorerne



Figur 8. Temperaturmålinger i de første dage efter montering af sensorerne

Foruden disse erfaringer tyder afprøvningen på, at sensorerne kan anvendes til styring og kontrol i visse dele af udførelsen. De forhold som forventes at kunne vurderes er:

- Hærdning og udtørring for betonen, så tidspunkt for epoxyprimning kan angives
- Klimabetingelser ved udlægning af epoxyprimning
- Opvarmning (maksimal og varighed) ved udlægning af fugtisolering
- Opvarmning ved asfaltudlægning

Konklusionen efter dette første forsøg var:

”For den præsenterede afprøvning under en nyudlagt fugtisolering forventes sensorernes største betydning at være nær udløbet af fugtisoleringens forventede levetid, om ca. 40 år, hvilket stiller krav om minimum 60 års holdbarhed for sensorerne. Men hvis der udvikles en billig og pålidelig metode til at udlægge sensorerne under gamle fugtisoleringer kan kravet til sensorernes holdbarhed reduceres til omkring 20 år. Udvikling af en sådan metode er en del af SensoByg projektet.”

De sensorer, der er udviklet efter dette indledende forsøg har i teorien en batterilevetid på 5-10 år.

4.2 4 af Vejdirektoratets store broer og en almindelig motorvejs bro

På 5 af Vejdirektoratets broer er der i 2009/2010 i alt installeret 23 sensorer i forbindelse med reparation af brodæk eller i forbindelse med særeftersyn af belægninger. De 5 broer, der er stillet til rådighed af Vejdirektoratet er:

Bro 013-021.00, Skovdiget, Østbro. 6 sensorer er installeret lige under fugtisoleringen med ca. 1 cm dæklag i forbindelse med reparation af banket, juli 2009. Placeringen af sensorerne på broen er vist på foto i Figur 9.

Bro 011-091.00, Borrevejle Vig Pæledæk, Nordbro. 4 sensorer er installeret lige under fugtisoleringen med ca. 1 cm dæklag i forbindelse med særeftersyn, august 2009. Placeringen af sensorerne på broen er vist på foto i Figur 10.

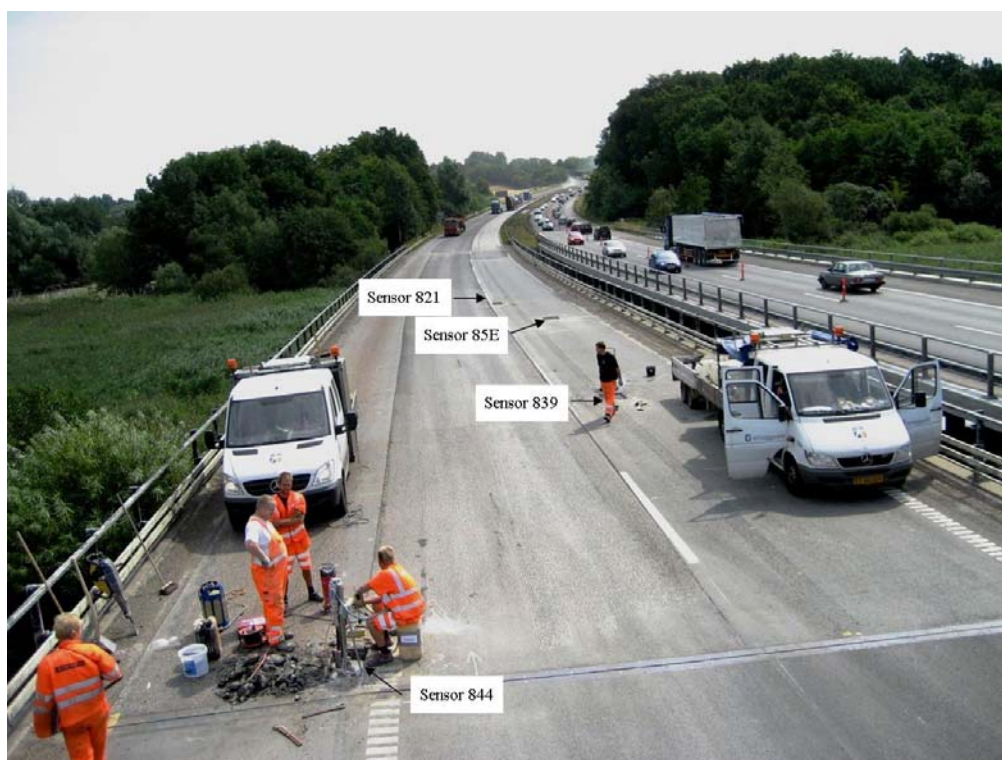
Bro 011-109.00, UF af bane på Holbæk motorvejen, Nordbro. 2 sensorer er installeret lige under fugtisoleringen med ca. 1 cm dæklag i forbindelse med ny profileringsbeton, september 2009. Placeringen af sensorerne på broen er vist på foto i Figur 11.

Bro 0013-0-028.00/10, Fiskebækbroen, Øst og Vestbro. I forbindelse med et overvågningsprogram er der udført særeftersyn af belægningen og installeret sensorer til at overvåge fugtforhold i travers under dilatationsfuger. 4 sensorer er installeret lige under fugtisoleringen med ca. 1 cm dæklag i forbindelse med særeftersyn af belægning, juni 2010. 4 sensorer er installeret i oversiden af travers ved dilatationsfuger. Placeringen af sensorerne på broen er vist på foto i Figur 12.

Bro 13-0-021.10, Bispeengbuen, Sydbro. 3 sensorer er installeret lige under fugtisoleringen med ca. 1 cm dæklag i forbindelse med særeftersyn af belægning, juli 2010. Placeringen af sensorerne på broen er vist på foto i Figur 13.



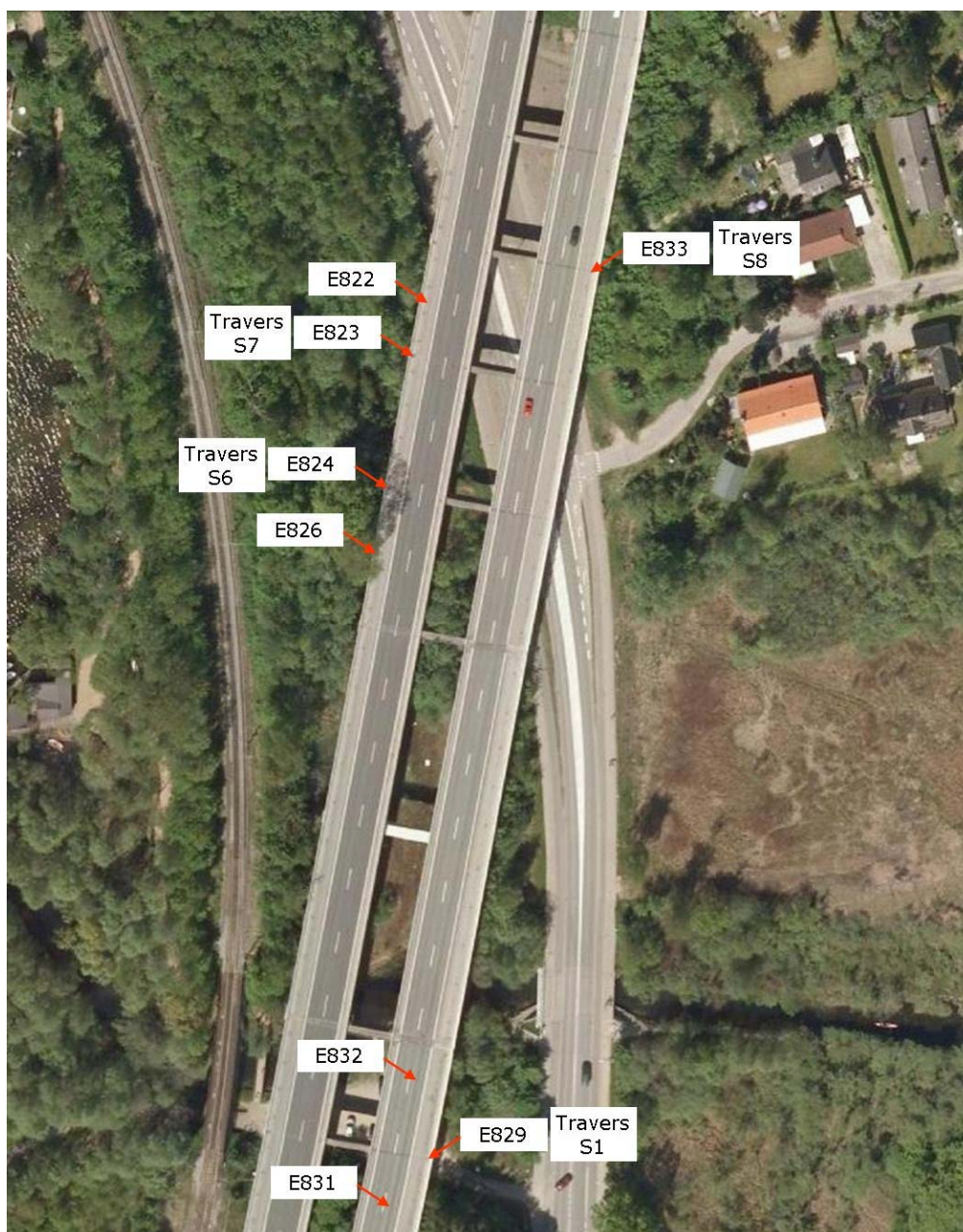
Figur 9. Placering af sensorer på østbro, ved Skovdiget på Hillerødsmotorvejen.



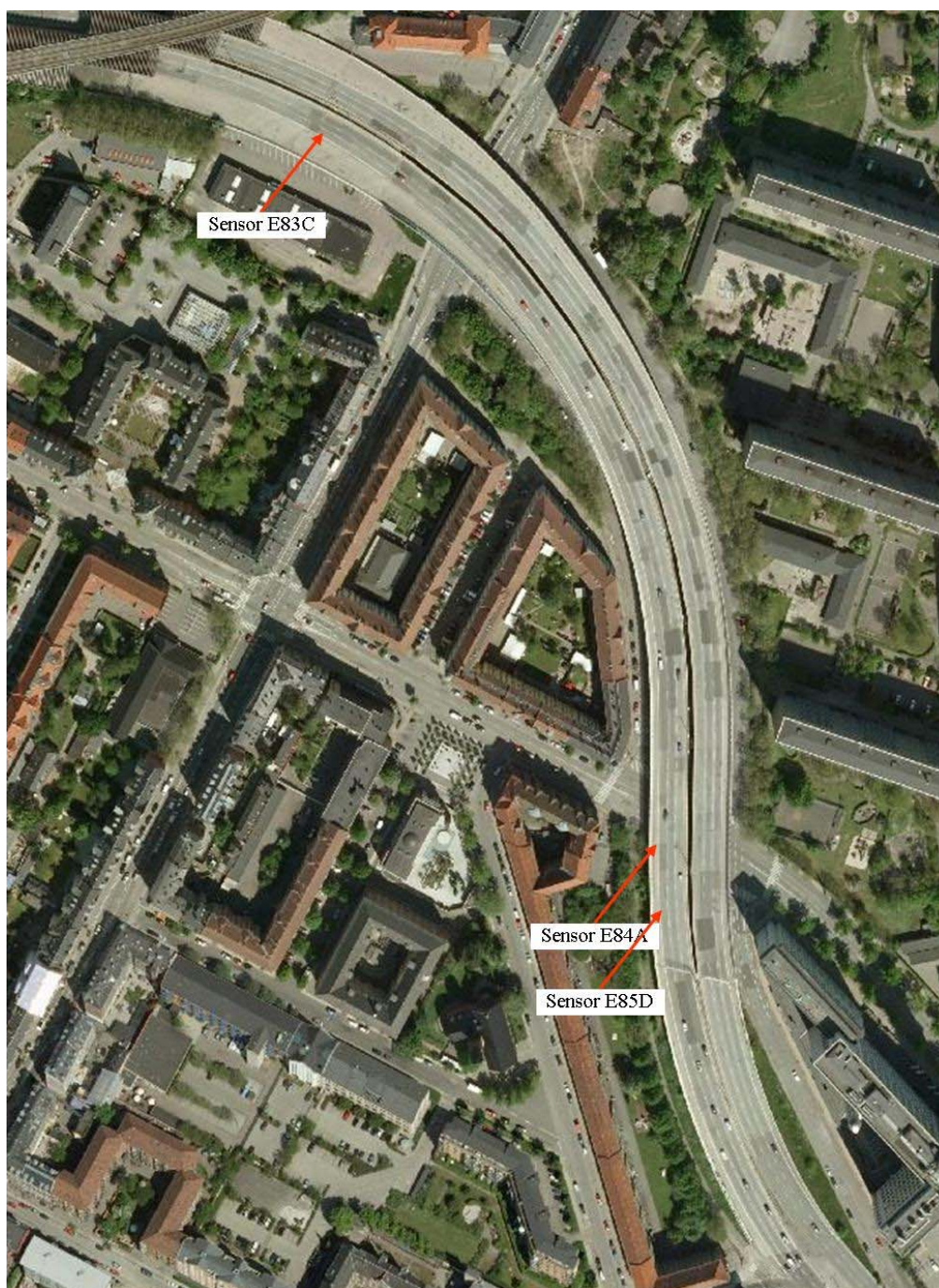
Figur 10. Placering af sensorer på nordbro, ved Borrevejle Vig på Holbækmotorvejen.



Figur 11. Placering af sensorer på nordbro i vestgående retning, ved Holbæk på Holbækmotorvejen.



Figur 12. Placering af sensorer på Fiskebækbroerne, ved Farum på Hillerødsmotorvejen.



Figur 13. Placering af sensorer på Bispeengbuen, sydbrø, København.

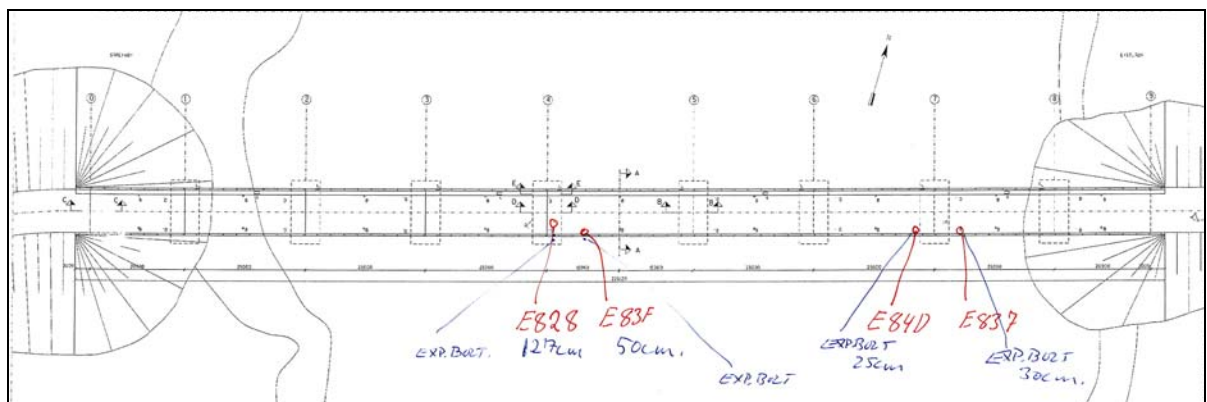
4.3 Landsverkets største bro på Færøerne

I august 2010 har Landsverket på Færøerne installeret 4 sensorer på den største bro på Færøerne, Bro 13-04 Brúgvín um Streymin. Installationen er sket i forbindelse med etablering en af et beton-profileringslag og udlægning af ny asfalt. Foto af broen er vist Figur 14.



Figur 14. Foto af Brúgvín um Streymin set fra nordsiden.

De 4 sensorers placering er vist på Figur 15.



Figur 15. Tegning med angivelse af placering af sensorer. Nord er opad på tegningen.

De 4 sensorer blev leveret til Landsverket i 2009 og sensorerne er ved installationen i 2010 ikke blevet tjekket inden de blev installeret.

En receiver blev sendt til Færøerne primo september til indsamling af data og det har kun været muligt at få kontakt til den ene sensor # E837, hvor der er registreret en temperatur på 7,6 °C, Relativ fugtighed på 93,3 % og batterispænding på 3,44 V. Det må derfor formodes de øvrige sensorer er defekte.

Landsverket har ikke en version af SMART, som inkluderer monitorings-modulet endnu. De får dette modul i løbet af efteråret 2010, hvor der kommer en opgradering til SMART. Først herefter vil sensorerne kunne oprettes i SMART og data overføres direkte til forvaltningssystemet. Indtil videre findes data kun som logfiler.

5 Installationen af sensorer

I dette afsnit beskrives de forskellige procedurer, der er anvendt ved installationen af sensorerne på Vejdirektoratets broer. Til sidst gives en vurdering af, hvor driftssikre sensorerne har været hid til.

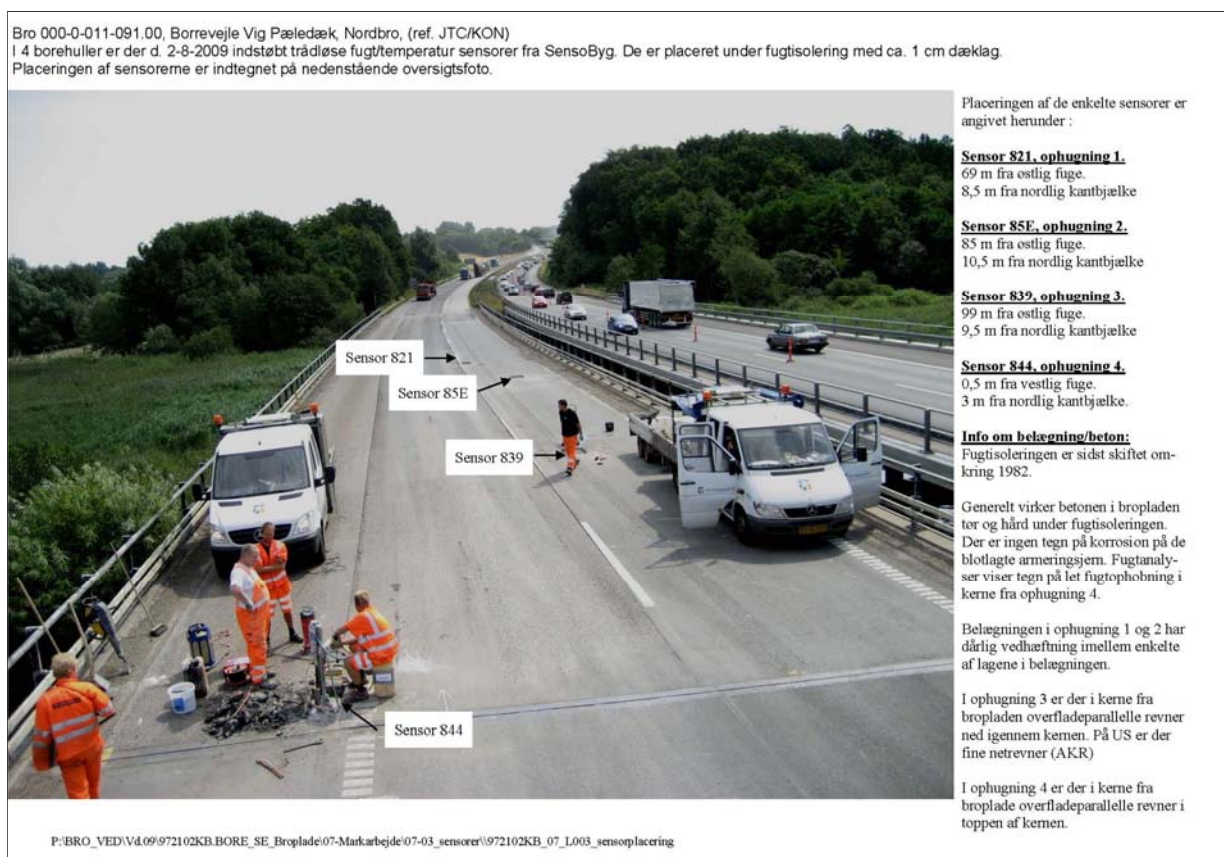
5.1 Installationsprocedure for sensorer

På de enkelte broer er placeringen af hver sensor noteret og beskrevet ud fra hvilken konstruktionsdel de er monteret i og med afstande eller lignende til fuger eller kantbjælker. Disse data er brugt til at oprette de enkelte sensorer som objekter i SMART-Monitoring på de rigtige konstruktionsdele. Data overføres efterfølgende automatisk trådløst via internettet til disse objekter efter hver måling.

Der er foretaget forskellige forsøg med "indpakningen" af sensorerne for at beskytte dem i forbindelse med installationen på nye og eksisterende broer. Dette er gjort for at se, hvor følsomme sensorerne er over for påvirkninger som fugt under udstøbningen og varmepåvirkning fra montagen af fugtisoleringen umiddelbart over sensorerne.

Generelt er alle sensorerne installeret, så der ikke er direkte kontakt imellem sensorerne og fugtisoleringen for at undgå at smelte sensorerne ved udlægning/fastbrænding af fugtisoleringen.

For alle sensorer er der lavet en udførlig beskrivelse af deres placering i de enkelte broer. Et eksempel på en installationsoversigt fra Borrevejle Vig Pæledæk er vist på Figur 16.



Figur 16. Eksempel på oversigt og beskrivelse af placeringen af sensorer på nordbroen, ved Borrevejle Vig Pæledæk.

5.2 Installation på broer i forbindelse med reparation

På broerne ved Skovdiget og Uf af bane på Holbækmotorvejen blev sensorerne installeret i forbindelse med reparationer af broerne.

5.2.1 Bro ved Skovdiget

På Skovdiget blev sensorerne installeret i forbindelse med reparation af den vestlige kantbjælke på den østlige bro. Sensorerne blev pakket ind i en lille kasse af finerplader, der var sømmet sammen og samlingerne var dækket med gaffatape. Sensorerne blev støbt ned i konstruktionsbetonen i et hul hugget ud med mejsel og støbt til med reparationsmørtel. Se foto af sensor inden udstøbningen i Figur 17.



Figur 17. Fotos af installation af sensorer på Skovdiget.

5.2.2 Bro UF af bane på Holbækmotorvejen

På broen UF af bane blev sensorerne installeret uden nogen form for ekstra indpakning af selve sensorerne. Sensorerne blev lagt i en udsparring formet af en træklods, der var støbt ned i den nye profileringsbeton. Kilen blev taget op og sensorerne lagt ned i hullet. Inden sensorerne blev støbt til, blev der lagt en ca. 5 mm tyk finerplade oven på sensorerne, så sensorerne kommer til at ligge i et hulrum. Se sammensat foto i Figur 18.



Figur 18. Fotos af installation af sensorer på Holbæk motorvejen.

5.3 Installation under fugtisoleringen ved særeftersyn

På broerne ved Borrevejle Vig, Fiskebæk broerne og Bispeengbuen blev sensorerne installeret i forbindelse med et særeftersyn af belægning og fugtisolering. Ved disse særeftersyn fjernes belægningen ned til og med fugtisoleringen inden for et område på ca. 0,5 m². Herefter udbores der typisk en kerne i konstruktionsbetonen med en diameter på ca. 100 mm. Sensorerne blev installeret i toppen af disse huller, hvor de først fyldes næsten til toppen med mørtel, sensoren sættes ned i hullet og der støbes op til overkant af hullet, så sensoren er dækket af ca. 1 cm reparationsmørtel.

5.3.1 Bro ved Borrevejle Vig

På Borrevejle Vig Pæledæk blev sensorerne pakket ind i en lille kasse af finerplader, der var sømmet sammen og samlingerne var dækket med gaffatape (samme som ved broen ved Skovdiget). Sensorerne blev støbt ned i konstruktionsbetonen i det borede hul. For at holde sensoren ned til reparationsmørtelen var hærdet, af blev der anvendt et stykke asfalt til at holde sensoren i det ønskede niveau. Se fotos i Figur 19. Efterfølgende blev hullet støbt helt op, fugtisolering blev brændt på og der blev etableret ny belægning.



Figur 19. Fotos af installation af sensorer på Borrevejle Vig pæledæk. Sensor holdes fast af gaffatape i borehullet og asfaltklumpen bruges til at holde sensoren nede i reparationsmørtelen imens den hærdet af.

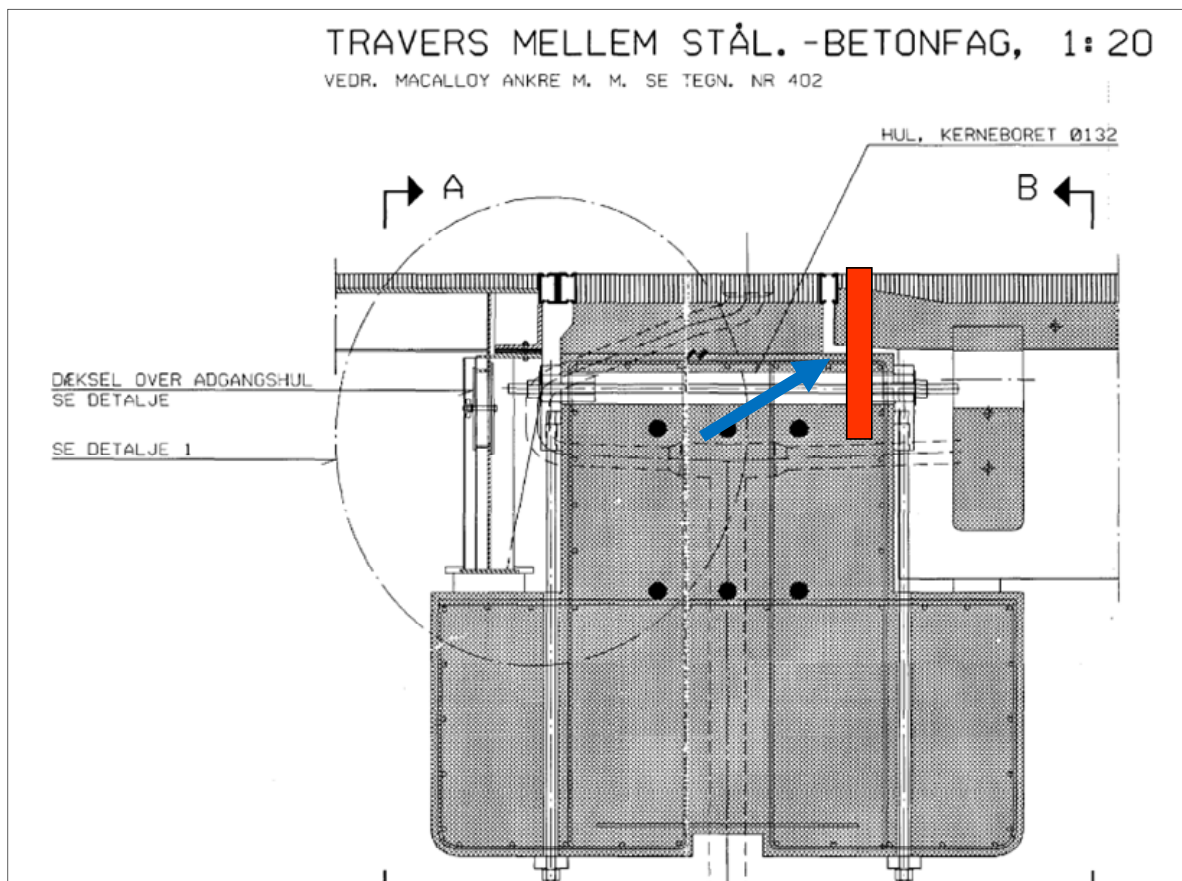
5.3.2 Fiskebækbroerne

På Fiskebækbroerne blev sensorerne pakket ind i gaffatape sammen med en tynd træplade uden på hullet til fugtmåleren. Træpladen blev herefter blotlagt på et område på ca. 1 cm². Se Figur 20.

På Fiskebækbroerne er 4 af sensorerne installeret i toppen af en travers under en dilatationsfuge imellem bropladerne, dvs. ca. 30 cm under bropladen. Dette er gjort for at se, hvor utætte fugerne er og om det evt. forårsager skader på traversen. Placeringen af sensoren er markeret med den blå pil på Figur 21.



Figur 20. Foto til venstre af indpakket sensor installeret på Fiskebækbroerne. Træpladen der beskytter hullet til fugtregistreringer kan anes på undersiden af sensoren. Foto til højre viser sensor placeret i boret hul i oversiden af travers.



Figur 21. Tegning, der viser snit i travers og broplade. Placeringen af den udborede kerne er vist med rød markering. Placeringen af sensoren er vist med blå pil.

De øvrige 4 sensorer er alle installeret i borede huller umiddelbart under fugtisoleringen i overside af broplade.

Som mørtel blev der ved alle sensorer anvendt en hurtighærdende lynstøbemørtel VB10. Den er i starten meget tyndtflydende og sensorerne blev derfor først lagt ned i toppen af mørtlen efter den var hærdet lidt af efter ca. 10 minutter. På dette tidspunkt er mørtlen stadig lidt flydende. For at holde sensoren nede til reparationsmørtelen var hærdet, af blev der anvendt et stykke asfalt til at holde sensoren i det ønskede niveau, ca. 1 cm under overkanten af hullet. Efter hærdningsprocessen er så fremskredet at sensoren holdes fast fyldes hullet op til overkanten, så sensoren dækkes af lidt mørtel og ikke får direkte kontakt med fugtisoleringen når den brændes fast på asfalten.

5.3.3 Bispeengbuen

På Bispeengbuen er der installeret 3 sensorer på den sydlige bro. Disse sensorer fik kun et lille stykke gaffatape monteret uden på fugtmåleren som vist på Figur 22.

De 3 sensorer er alle installeret i borede huller i bropladen umiddelbart under fugtisoleringen i overside af broplade.

Som mørtel blev der ved alle sensorer anvendt en hurtighærdende lynstøbemørtel VB10. Udstøbningsproceduren er derfor den samme som på Fiskebækbroerne, beskrevet ovenfor.



Figur 22. Foto af sensor monteret på Bispeengbuen.

5.4 Driftssikkerhed af sensorer

Driftssikkerheden og levetiden af sensorerne har i forbindelse med dette forsøg været begrænset. Til dags dato har de indstøbte sensorer maksimalt overlevet 1 år. Dette skyldes formodentlig enten opsætningen af sensorernes elektronik (utilsigtet højt strømforbrug) eller, at de er blevet beskadiget under eller kort tid efter installationen.

Fra starten af dette forsøg er der afprøvet forskellige metoder for at beskytte sensoren mod den fysiske påvirkning, der kan være fra afhærdningen af beton eller mørtel eller montagen af fugtisoleringen umiddelbart over sensoren. Som standard leverer TI sensorerne pakket ind i en lukket kasse af hård plast, hvori der er et lille hul til registrering af fugtigheden af den omgivende beton/reparationsmørtel. Se **Error! Reference source not found..**

Som beskrevet og vist i afsnit 5.1 er der afprøvet forskellige tiltag for at beskytte målesonden yderligere. Der er forsøgt med indpakning i små kasser af finerplader eller indpakning i gaffatape. Alle forsøg har dog ikke umiddelbart haft nogen effekt, idet mange sensorer låser, når den relative fugtighed når 100 % og de kan efterfølgende ikke viser nogen variation i den relative fugtighed.



Figur 23. Foto af sensor uden ekstra indpakning. Hul til registrering af fugt er nederst til højre på sensoren.

Til indstøbningen er der anvendt forskellige former for reparationsmørtler, der blandes på stedet og som gerne skal hærde hurtigt af. Den hurtige afhærdning ønskes af hensyn til den begrænsede rådighedsperiode (6-8 timer), der normalt er for en bro i forbindelse med afspærringer ved f.eks. et særeftersyn. Konsistensen af disse blandinger kan varieres fra meget flydende mørtler (f.eks. lynstøbemørtel VB10, med en hærdetid på 10-15 minutter) til mere almindelige mørtler, hvor konsistensen er rimelig fast og formbar fra starten. Ved anvendelse af lynstøbemørtlen, som på f.eks. Fiskebækbroerne og Bispeengbuen, har sensorerne været pakket enten helt ind i gaffatape eller hullet, der registrer fugtigheden har været dækket af et lille stykke tape.

Sensorer der blev installeret i 2009 var alle, som standard, sat op til at sende data ca. hvert 15. minut og samtidig "lytte" efter om der var en receiver, der modtog data og om der evt. var besked fra receiveren om ændringer i opsætningen. Sensorerne installeret i sommeren 2010 kan kun sende data. Dette gøres med et interval af ca. 2 minutter. Denne opsætning sparer strøm da sensorerne ikke skal tjekke om data modtages af en receiver.

På enkelte sensorer, der er installeret i 2010, er der kort tid efter installationen observeret en hurtig forøgelse af den relative fugtighed, der måles. Enkelte sensorer er kommet op på 100 % relativ fugtighed og er herefter "låst" så de ikke kan registrere efterfølgende udsving.

Blandt den sidste sending af sensorer leveret af TI i sommeren 2010 er der 4 stk., der ikke er blevet installeret på nogen bro endnu. Ved en kontrol sidst i august er én af disse sensorer (E85C) holdt op med at virke. Ved en kontrol af alle udleverede sensorer midt i juli fungerede den stadig. Teknologisk Institut fik tilsendt sensoren til nærmere undersøgelse og kunne konstatere, at batteriet var fladt. Grunden til at batteriet efter kort tid var fladt var, at sensorens strømforbrug i "sleep mode" (imellem målinger) er mere end 100 gange for højt. 3 af sensorerne fra samme sending er installeret på Bispeengbuens sydbro. To af dem var ved sidste måling i august defekte. Det formodes disse sensorer har samme problem med hurtig afladning af batteriet.

I Tabel 1 er en samlet oversigt over sensorerne på de enkelte broer, deres placering, dato for seneste registrerede måling, status for sensorerne pr. 25/10 2010 og deres leveringsdato fra TI.

Table 1. Oversigt over status for de installerede sensorer.

Bro	Sensor nr.	Installeret	Konstruktion	Seneste måling	Status 25/10 2010	Leveringsdato for sensorer
Bro 013-021.00, Skovdiget, Østbro	E820	juli 2009	Kantbjælke, under fugtisoleringen	20/7 2009	Defekt	April/maj 2009
	E82B			6/9 2009	Defekt	
	E83B			NA ¹	Defekt	
	E830			6/9 2009	Defekt	
	E84B			6/9 2009	Defekt	
E834	NA ¹	Defekt				
Bro 011 20091.00, Borrevejle Pæledæk, Nordbro	E821	august 2009	Broplade, under fugtisoleringen	NA ¹	Defekt	April/maj 2009
	E85E			NA ¹	Defekt	
	E839			23/6 2010 ²	Defekt	
	E844			2/8 2009	Defekt	
Bro 011 20109.00, UF af bane på Holbæk motorvejen, Nordbro	E836	september 2009	Broplade, under fugtisoleringen	2/9 2009	Defekt	April/maj 2009
	E83E			NA ¹	Defekt	
Bro 0013-0-028.00/10, Fiskebækbroen, Øst og Vestbro	E822	juni 2010	4 stk. i broplade, under fugtisoleringen. 4 stk. i top af travers, under dilatationsfuger	31/8 2010	Defekt	Maj/juni 2010
	E823			25/10 2010	Delvist OK ³	
	E824			25/10 2010	Delvist OK ⁴	
	E826			25/10 2010	Delvist OK ⁴	
	E829			31/8 2010	Defekt	
	E831			25/10 2010	Delvist OK ⁴	
	E832			27/7 2010	Defekt	
E833	25/10 2010	Delvist OK ⁴				
Bro 13-0-021.10, Bispeengbuen, Sydbro	E83C	juli 2010	Broplade, under fugtisoleringen	25/10 2010	OK	Maj/juni 2010
	E84A			15/7 2010	Defekt	
	E85D			25/10 2010	OK	
Bro 13-04 Brúgvín um Streymin, Færøerne	E828 ⁴	August 2010	Broplade, under fugtisoleringen	22/9 2010	Defekt	April/maj 2009
	E83F ⁴			22/9 2010	Defekt	
	E84D ⁴			22/9 2010	Defekt	
	E837 ⁴			22/9 2010	OK	

¹ Ingen data efter installationen

² Seneste målte spænding er 3,33 V, RH = 95,75 %

³ Sensorerne er låst ved 100 % RH

⁴ Sensorerne er sendt til Færøerne i 2009

6 Indsamling af data

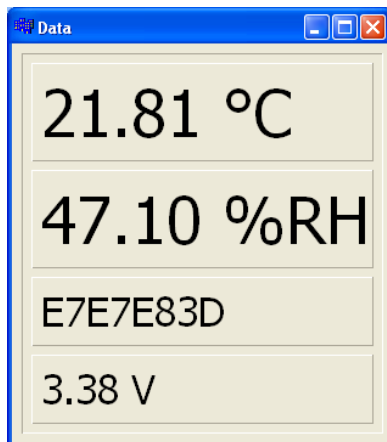
Indsamlingen af data er foretaget med et håndholdt måleudstyr, hvori der er indbygget antenne til modtagelse af data og et modem med simkort, så data kan sendes trådløst til en server. Til enheden kan der tilsluttes en ekstern antenne, hvis der skal måles på sensorer på en afstand af mere end 3-4 m. Enheden kan også tilsluttes en PC, så man på stedet kan se de modtagne data og evt. lave en logfil med de målte data.

På Figur 24 ses et eksempel på, hvordan der foretages målinger på den østlige bro ved Skovdiget i Bagsværd. Operatøren står i sikkerhed bag autoværnet på en cykelsti og har på fotoet måleboksen i venstre hånd. Der er tilsluttet en ekstern antenne til måleboksen, da der skal måles på sensorer, der er støbt ind i banketten ved rækværket på den modsatte side af broen. Sensorer foran antenne kan detekteres inden for en vinkel på ca. +/- 20 grader fra centerlinjen af den eksterne antenne. Afstanden fra autoværnet og over til sensorerne er ca. 15 m (på tværs af tilkørselsspor og 2 vejbaner).

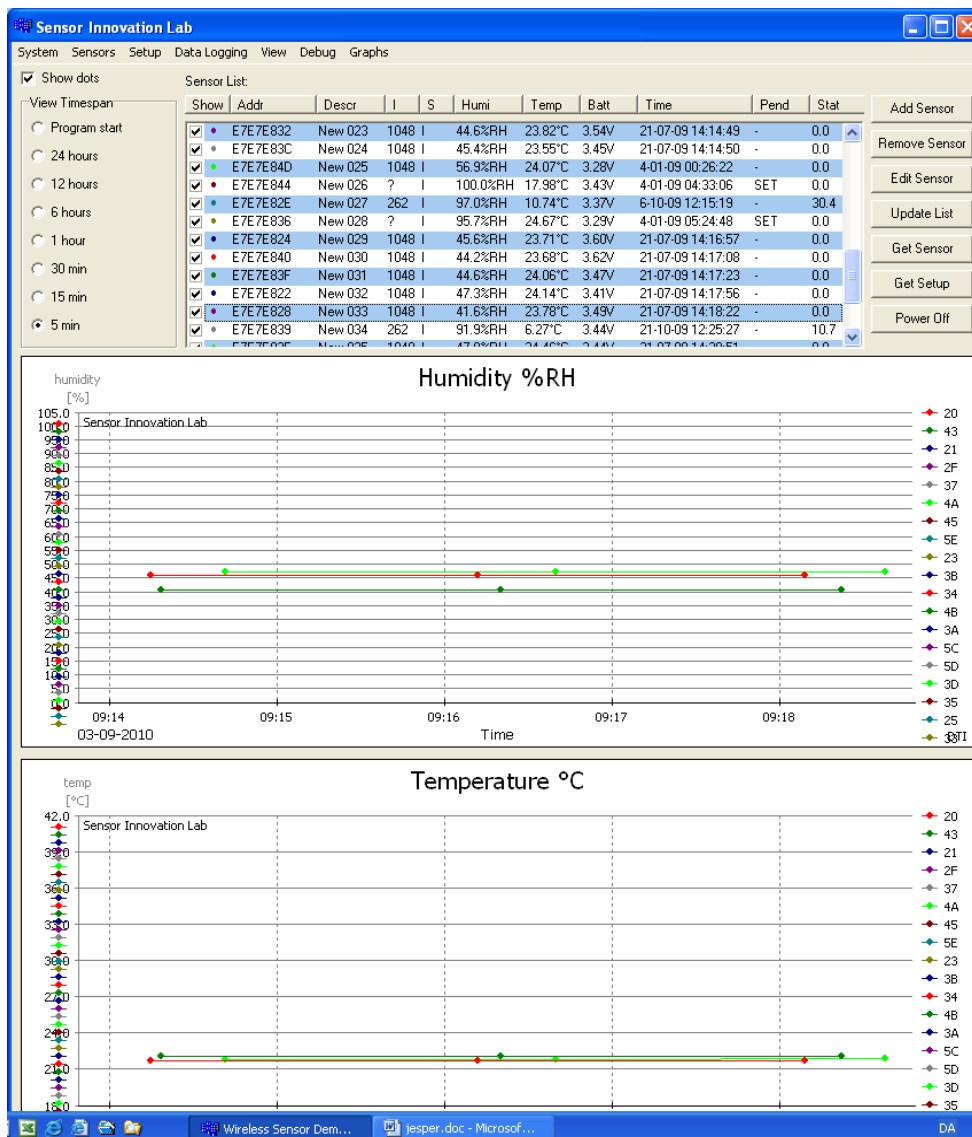


Figur 24. Måling på fugtsensorer på bro ved Skovdiget, Hillerødmetovvejen, ved Bagsværd.

Måleboksen er tilsluttet en bærbar PC, hvorpå målingerne registreres og kan følges kontinuert. Enten for en sensor af gangen, se Figur 25, eller i en grafisk oversigt med alle sensorer, der modtages data fra, se Figur 26.



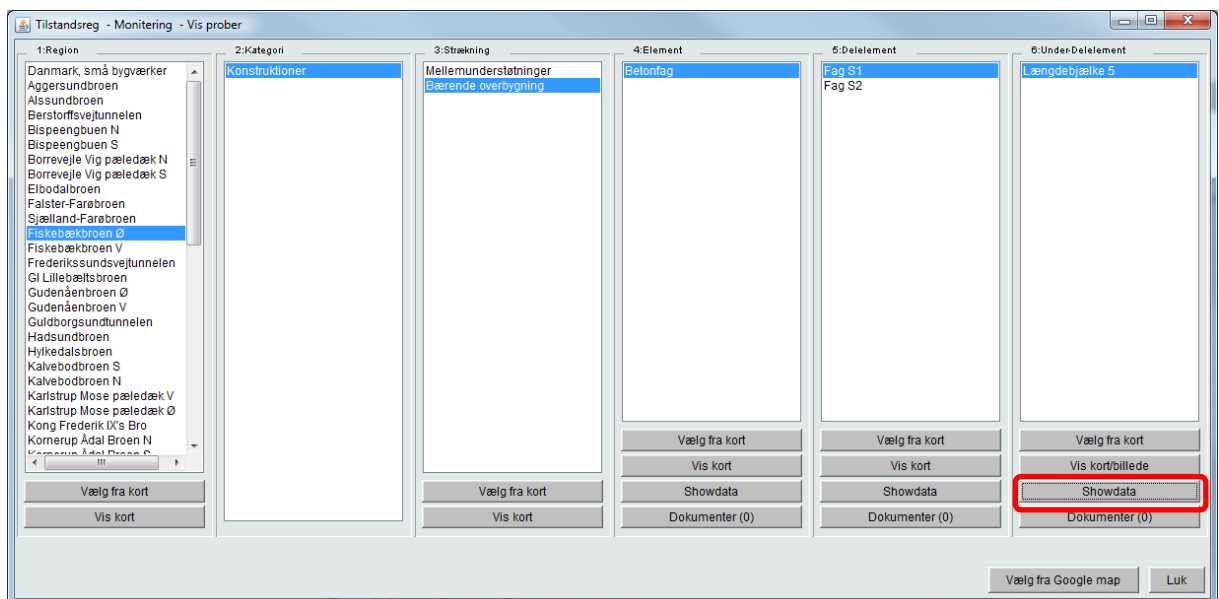
Figur 25. "Vindue", der viser de modtagne data fra sensor nr. E83D.



Figur 26. Grafisk presentation af data. Der vises data for den relative fugtighed og temperaturen.

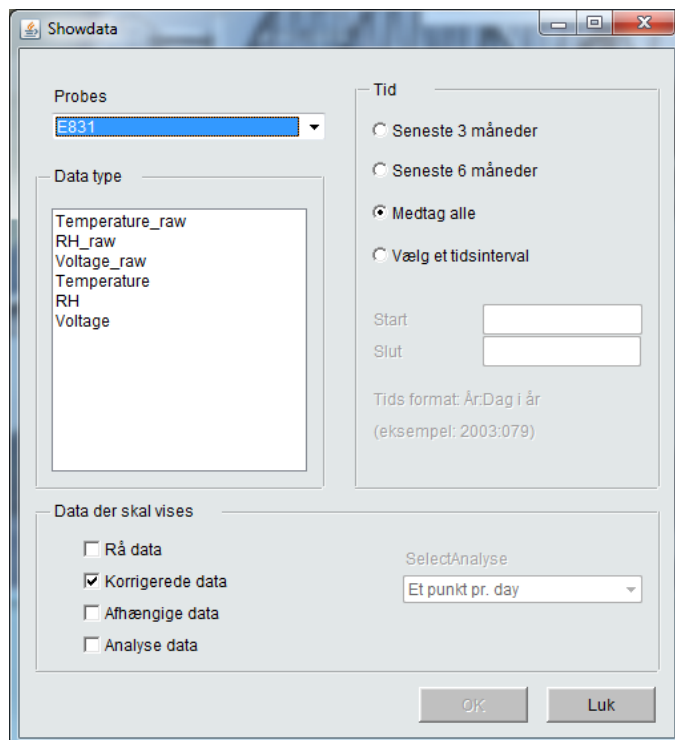
Måleboksen kan indstilles til at sende data umiddelbart efter de er modtaget til en server hos Rambøll. Disse data bliver automatisk overført til forvaltningssystemet SMART Monitoring ca. hver halve time, hvorefter alle data kan aflæses for den pågældende sensor.

I forvaltningssystemet SMART Monitoring har Rambøll registreret hovedparten af Vejdirektoratets broer, hvor der er informationer om i hvilke konstruktionsdele, der er indstøbt sensorer. F.eks. er der på den østlige bro af Fiskebækbroerne i den bærende overbygning, betonfag, fag S1, længdebjælke 5 indstøbt en sensor. Se Figur 27



Figur 27. Skærbillede fra SMART, der viser de enkelte delelementer på den østlige bro på Fiskebækbroen.

Ved at vælge "Show data" i softwaren for "længdebjælke 5" ses, at der er indstøbt en sensor med ID E831. Brugeren kan herefter vælge at se forskellige data som f.eks. de målte værdier for den relative fugtighed eller temperaturer. Se Figur 28.



Figur 28. ID for indstøbt sensor og valgmuligheder for, hvilke data der skal vises.

7 Måleresultater

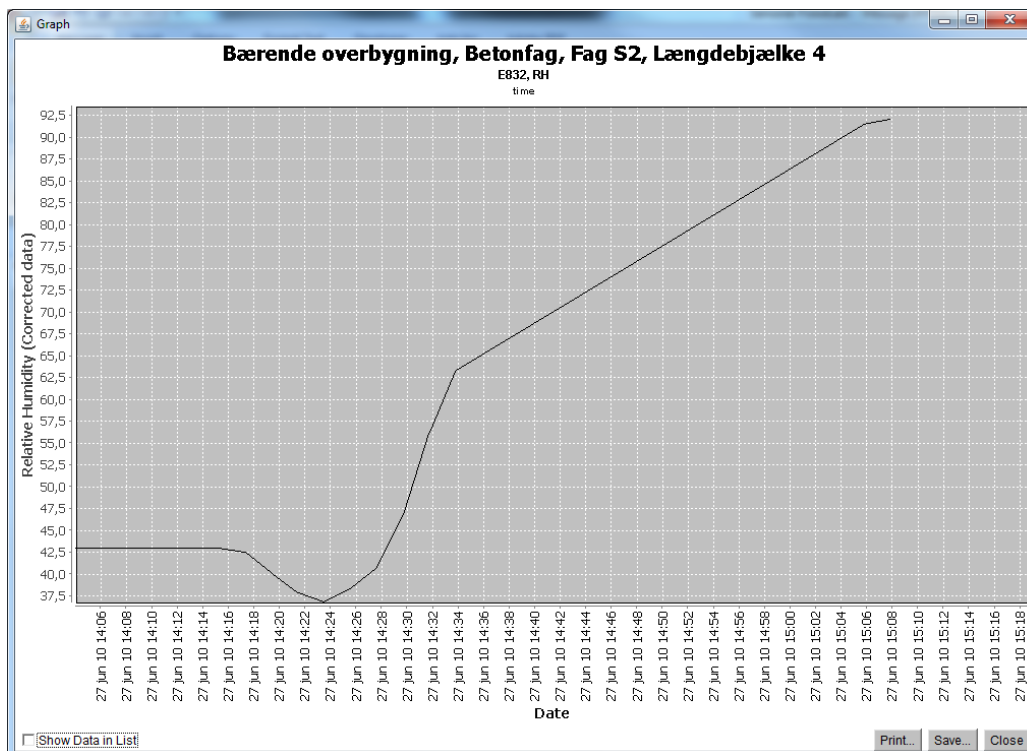
I dette afsnit præsenteres udvalgte resultater for målingerne på sensorerne fra de 5 broer stillet til rådighed af Vejdirektoratet.

Erfaringen fra installationen og målingerne på sensorerne i 2009 og 2010 har vist, at der fortsat er et behov for, at videreudvikle sensorerne mht. holdbarhed og levetid. Stort set ingen af de installerede sensorer har virket mere end et år efter installationen. Enkelte sensorer har vist sig at være defekte kort tid efter installationen. Derfor er omfanget af måledata relativt begrænset.

For sensorer installeret i 2010 er der ved det sidst modtagne sæt af sensorer ved en kontrol konstateret en fejl i elektronikken i den ene sensor, så strømforbruget er meget højt i hvilefasen imellem data sendes. Denne fejl er udelukkende opdaget da enkelte af sensorerne endnu ikke var installeret i en bro, men lå på kontoret og blev brugt som reference til afprøvning af udstyr. To andre sensorer fra samme sending er ca. 1 måned efter installationen også defekte og har muligvis samme fejl i elektronikken.

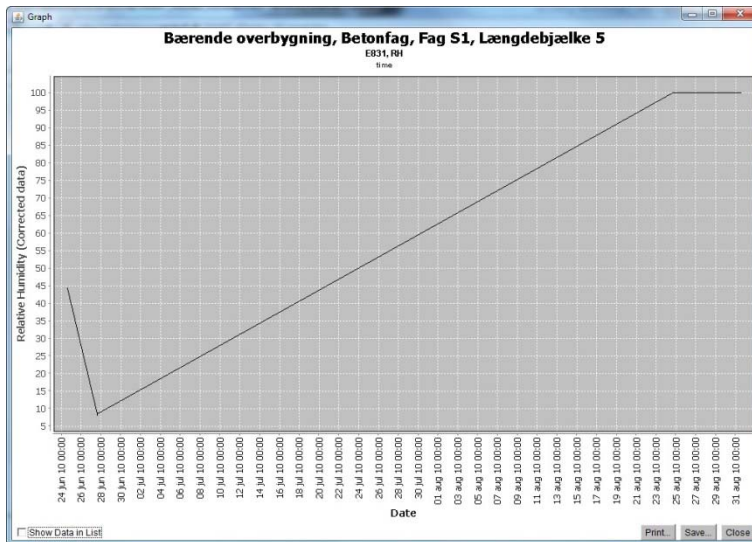
I 2010 er der konstateret problemer med sensorernes følsomhed over for fugtbelastningen. Mange sensorer er "låst", når den relative fugtighed når 100 %. Dette problem er kun observeret på enkelte sensorer i 2009. Da den relative fugtighed i beton eller mørtel, der udstøbes er høj, giver dette problemer, hvis sensorerne låser ved 100 % relativ fugtighed. Efter betonen er hærdet af, vil den relative fugtighed i beton være i ligevægt med omgivelserne og ligge på ca. 90 % eller mere.

Et eksempel på sensorernes følsomhed over for fugt efter indstøbningen kan ses på Figur 29. Her er den relative fugtighed i sensoren registreret lige før og løbende efter indstøbningen. Fugtigheden vokser fra ca. 37 % til ca. 92 % på ca. 40 minutter.

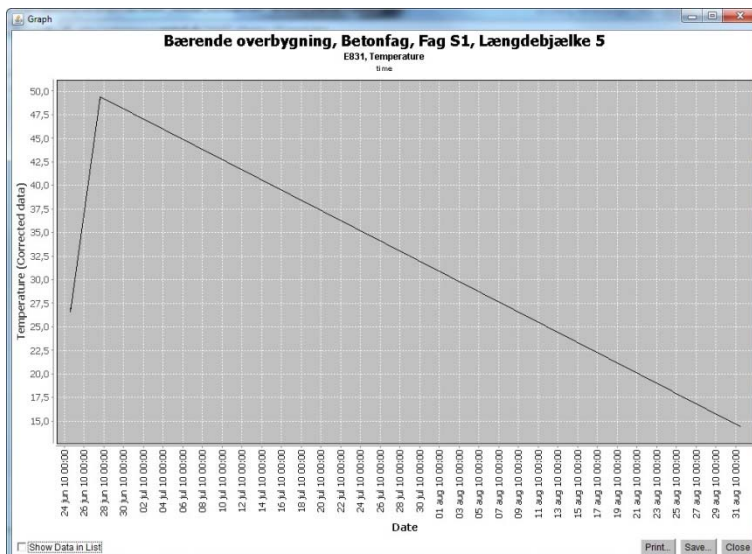


Figur 29. Relative fugtmålinger for sensor E832 lige før og efter den er indstøbt i konstruktionen. Udtræk fra SMART Monitoring.

Et andet eksempel viser, at der ikke umiddelbart kun kan udledes noget om fugten i konstruktionen baseret alene på de målte relative fugtigheder. På Figur 30 og Figur 31 ses et eksempel på, hvor meget den relative fugtighed kan varieres afhængig af temperaturen i konstruktionen. I dette tilfælde er der målt på en sensor, der er placeret i betonen lige under fugtisoleringen.

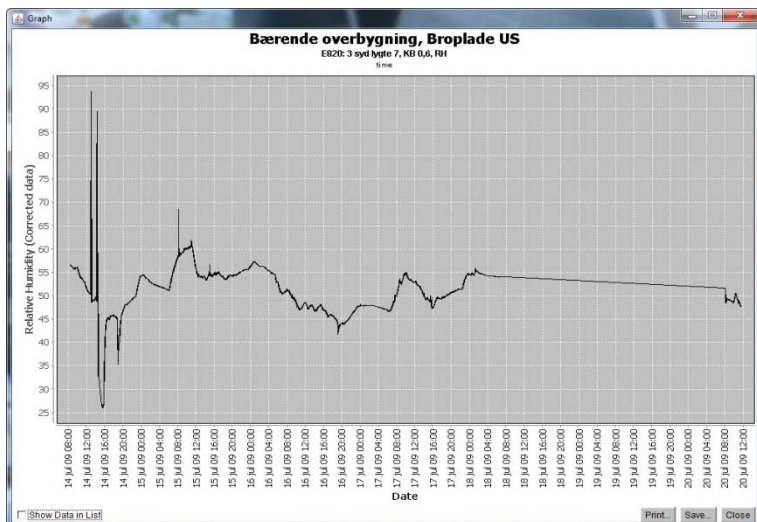


Figur 30. Måling af relativ fugtighed på den Østbroen ved Fiskebækbroerne.

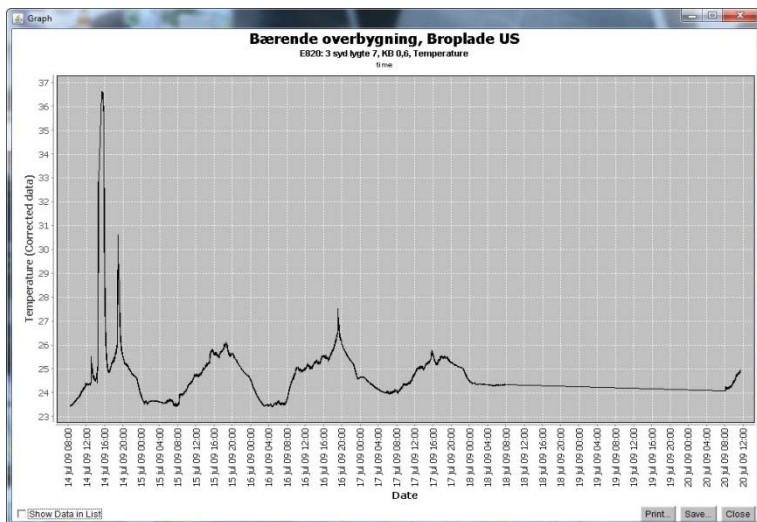


Figur 31. Måling af temperatur på den Østbroen ved Fiskebækbroerne.

På en enkelt sensor, E820, på østbroen ved Skovdiget er der foretaget kontinuerte målinger over en periode på 3 dage for at se døgnvariationen på målingerne. Der er målt pr. 15. minut. Se Figur 32 og Figur 33. Her ses som før også en korrelation imellem de målte relative fugtigheder og temperaturen i konstruktionen.



Figur 32. Målinger af relativ fugtighed over en periode på 3 dage.



Figur 33. Målinger af temperatur over en periode på 3 dage.

Alle måledata for sensorerne er vist i bilag 1.

8 SMART-Monitoring – et vedligeholdssystem til infrastrukturanlæg

8.1 Generelt

Rambøll har udviklet det webbaserede vedligeholdssystem SMART-Monitoring som et moderne IT-værktøj, der muliggør et systematisk og veldokumenteret vedligehold af anlægskonstruktioner. SMART giver brugere og beslutningstagere på alle niveauer i organisationen adgang til de nødvendige værktøjer og information som danner baggrund for en effektiv styring og planlægning af drift og vedligehold.

Infrastrukturanlæg er meget forskellige i sammensætning, kompleksitet og størrelse, men principperne for en systematisk vedligeholdsstyring er relativt universelle. Definitionen af de anlæg, hvor vedligeholdet skal styres med SMART, er baseret på et unikt prototype-koncept, som tillader brugeren at anvende tilstandsregistreringen, aktivitetsstyring, budgettering, monitoring og dokumenthåndtering på meget forskellige konstruktioner. Således bruges SMART til styring af vedligehold på så forskellige konstruktioner som havne, veje, små broer, store broer, tunneller, rørunderføringer, vandforsyningssystemer, kloaksystemer og vindmøller.

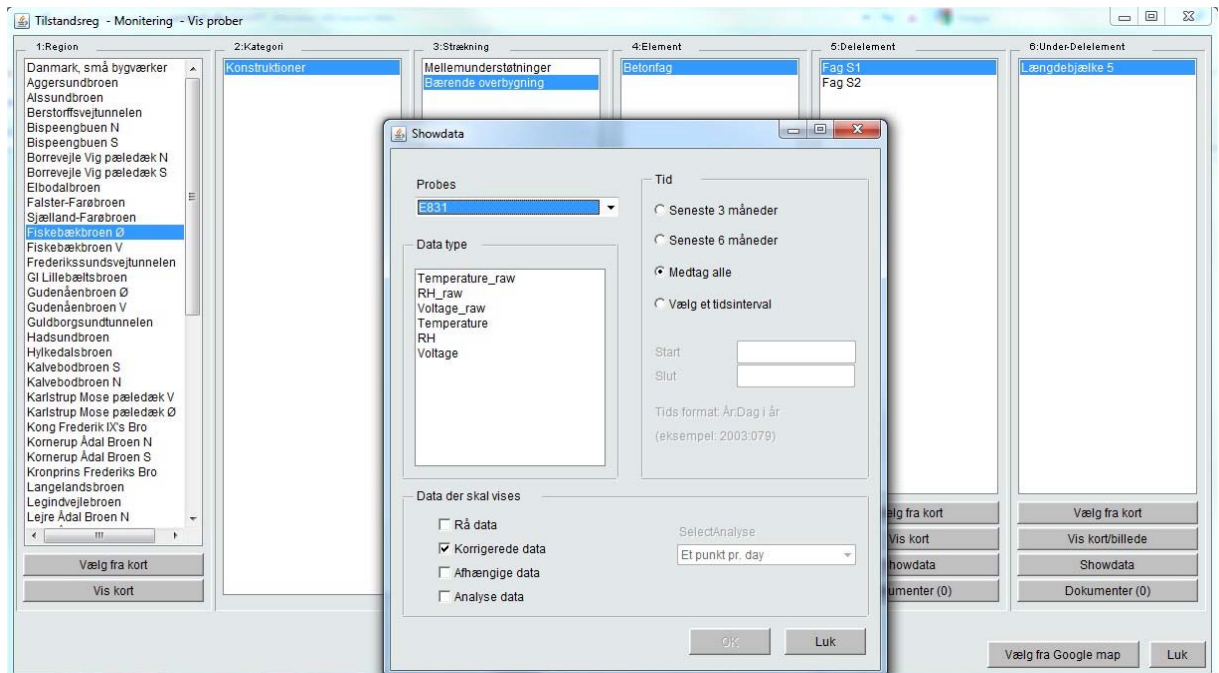
SMART kan håndtere alle drifts og vedligeholdsaktiviteter. De kort- og langsigtede budgetkrav til udførelse af de indmeldte aktiviteter, kan vises som illustrative søjlediagrammer. Diagrammerne kan vise fordelingen mellem jobtyper, jobprioritet eller jobstatus, og for det indeværende år kan de faktiske omkostninger vises i forhold til de oprindelige estimerede overslag.

De indmeldte job håndteres via en prioriteringsprocedure, hvor det besluttes, hvilke job der skal vælges til udførelse. Som en hjælp i beslutningsprocessen gives brugeren et løbende opdateret overblik over de budgetmæssige konsekvenser af valgene. Endvidere vises de pågældende elementers tilstandskarakter, således at man kan sikre sig, at man får håndteret de alvorligste skader.

8.2 Monitoringsmodul

Alle Vejdirektoratets større broer er oprettet i en SMART-Monitoring database i forbindelse med Sensobyg projektet, og de installerede sensorer (efterhånden som de er blevet installeret på broerne) blevet oprettet som underelementer på de respektive broers delkonstruktioner med en præcis angivelse af, hvor de er installeret.

Ved hver enkelt registreret måling fra en sensor overføres data automatisk til en server hos Rambøll, hvorfra SMART-Monitoring softwaren automatisk indhenter de nyeste data hver halve time og placerer data i de respektive broers registreringsdatabase. Se Figur 34.



Figur 34. Skærbillede fra SMART, der viser en brods opdeling i konstruktionslementer med tilhørende sensorer.

I forbindelse med SensoByg projektet er der foretaget to væsentlige forbedringer af SMART-Monitoring:

1. Indsamling og behandling af data for sensorerne i SMART er blevet automatiseret. Når data først er målt og sendt til en server henter SMART selv data og allokerer dem til de rigtige sensorer⁵.
2. Præsentationen af data grafisk er blevet automatiseret.

Generel information of SMART-Monitoring er vist i bilag 3.

⁵ Det skal bemærkes, at dette kun gælder for den type af sensorer, der er udviklet i forbindelse med SensoByg projektet. Skal der måles på en anden type sensorer kræves der lidt programmering inden SMART kan håndtere formatet af data.

9 Perspektiver og udviklingsmuligheder

Visionen med de trådløse sensorer er, at få et værktøj, som bl.a. hjælper med overvågningen af tilstanden af de konstruktionsdele, der ikke er umiddelbart tilgængelige.

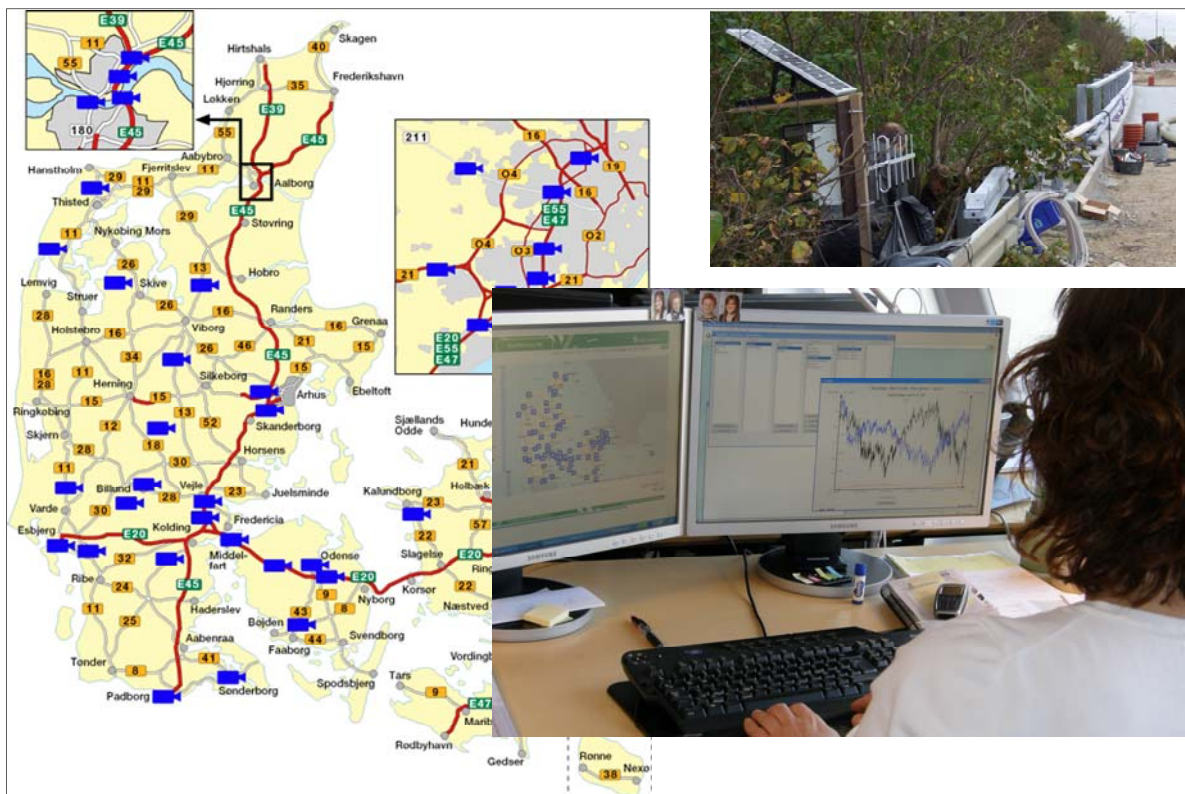
De primære områder, hvor sensorerne kan bruges til optimering af drift og vedligehold er ved:

- Undgå skjulte nedbrydninger.
- Vurdering af forhold i særligt udsatte områder (f.eks. støbeskel)
- Vurdering af forhold på vanskeligt tilgængelige områder (i jord, fuger, evt. under fugtisoleringer)

Data skal hjælpe med at:

- Resultater indgår direkte i forvaltningssystem
- Udskydelse af udbedring
- Udnyttelse af broens sidste fase
- Skræddersy reparationer
- Dokumentation af tilstande

Informationerne skaffes i dag ved hjælp af traditionelle eftersyn og drømmen er at de driftsansvarlige kan overvåge de enkelte broer via et forvaltningssystem. Se Figur 35.



Figur 35. Illustration af visionen om trådløs monitoring af bygværker.

I 2010 er der konstateret problemer med de anvendte sensorers følsomhed over for fugtbelastningen. Hovedparten af sensorerne er "låst", når den relative fugtighed når 100 %. I forbindelse med udstøbning af beton/mørtel vil den relative fugtighed i praksis være 100 % og den vil efterfølgende aftage når betonen hærdner af. Der er derfor behov for at sensoren kan tåle den høje fugtighed under udstøbningen uden at låse.

Batteriernes levetid er umiddelbart kortere end håbet. Næsten alle sensorer installeret i 2009 er defekte. Det formodes at skyldes et forhøjet strømforbrug da sensorerne både har skullet ende data og vente på om der blev sendt info til dem fra modtageboksen. F.eks. hvis måleintervallet skulle ændres. På sensorerne modtaget og installeret i 2010 er der konstateret en fejl i softwaren på nogle sensorer, som har bevirket et meget højt strømforbrug, hvorefter batteriet har holdt højest nogle måneder.

Opsamlingen og overførsel af data til forvaltningssystemet SMART-Monitoring fungerer i det store og hele uden problemer. Kendskabet til placeringen af sensorerne på de enkelte broer er dog påkrævet, hvis aflæsningen af data kun udføres via en mobil receiver og ikke en fastmonteret. Hvis placeringen ikke er kendt eller glemt kunne en løsning fremover være at bruge sin mobil-telefon eller dataopsamlingsenheden, f.eks. SMART mobile til at lokalisere sensorerne på den pågældende bro. Teknikken vil kræve, at sensorernes x,y,z-koordinater registres i forbindelse med indstøbningen samt at SMART mobile er forsynet med GPS samt gyro-funktionalitet.

I forbindelse med lokaliseringen af sensorer i en bro vil proceduren være følgende:

- Man retter sin SMART mobile mod den aktuelle bro. Man ser nu broen på displayet. Sensorernes placering vil nu fremgå som røde prikker eller lign på mobildisplayet.

Andre udviklingsmuligheder kunne være:

- Passive sensorer – dvs. uden strømforsyning i form af batteri eller ledning.
- "Multihop"- dvs. sensorerne kan kommunikere sammen og derved sende data og styringsinformationer over store afstand på trods af lille senderækkevidde for den enkelte sensor.
- Måling af klorid, karbonatisering, korrosionsaktivitet m.m.
- Indstøbning direkte i betonblandinger og derved spredes sensorerne rundt i hele betonkonstruktionen.

BILAG 1

Måledata for monitoring af trådløse sensorer

[Vejdirektoratets broer]		Side: 1 af 27
Projekt: [7721025]	Dato: [Oktober 2010]	Init: [JTC]
Emne:	[Måledata for trådløse sensorer]	
Placering:		

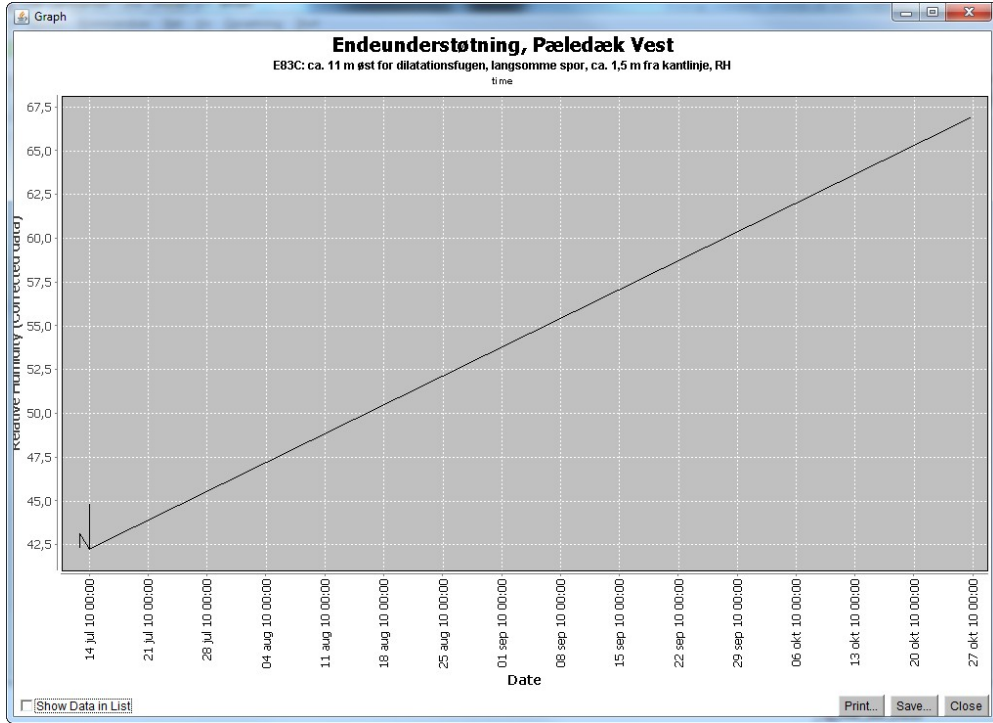


Foto 1: Bispeengbuen

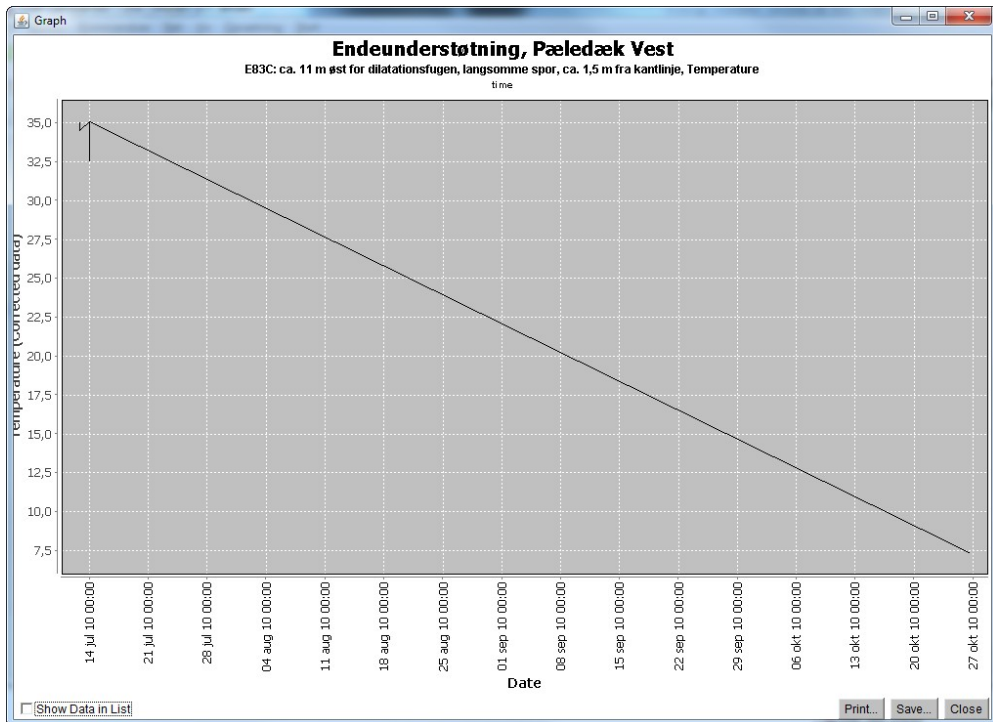


Foto 2: Bispeengbuen

[Vejdirektoratets broer]		Side: 2 af 27
Projekt: [7721025]	Dato: [Oktober 2010]	Init: [JTC]
Emne:	[Måledata for trådløse sensorer]	
Placering:		

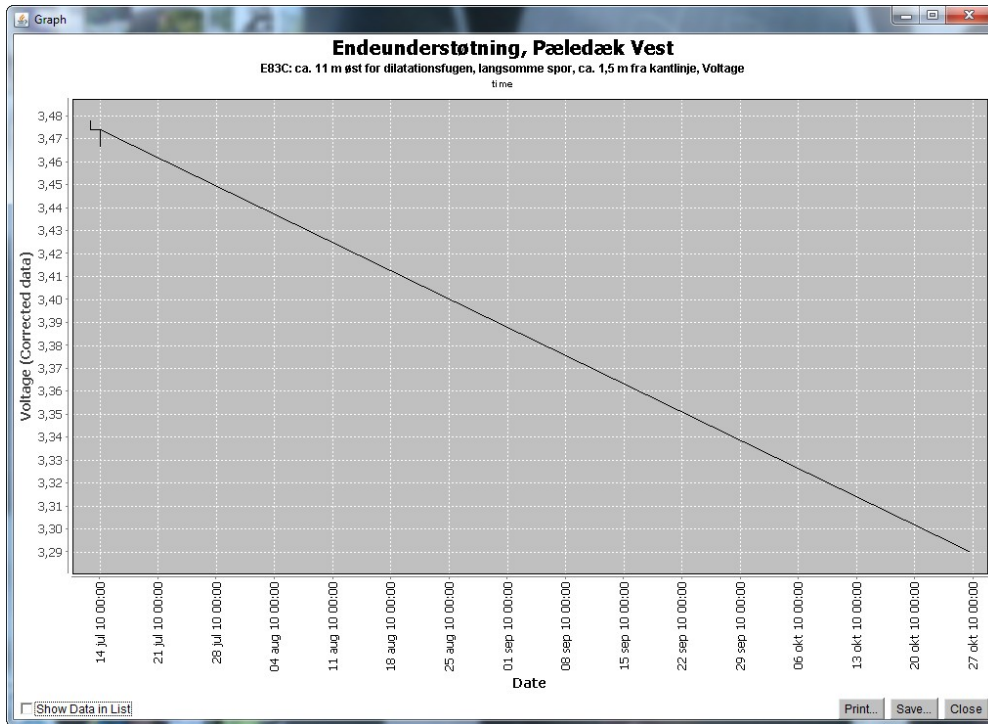


Foto 3: Bispeengbuen

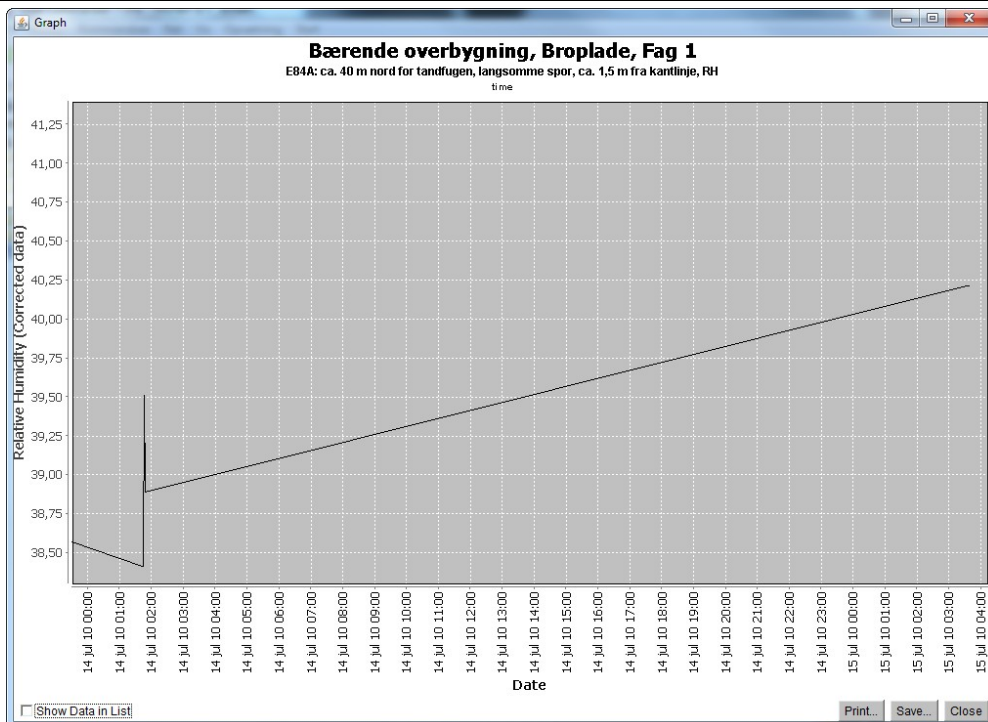


Foto 4: Bispeengbuen

[Vejdirektoratets broer]		Side: 3 af 27
Projekt: [7721025]	Dato: [Oktober 2010]	Init: [JTC]
Emne:	[Måledata for trådløse sensorer]	
Placering:		

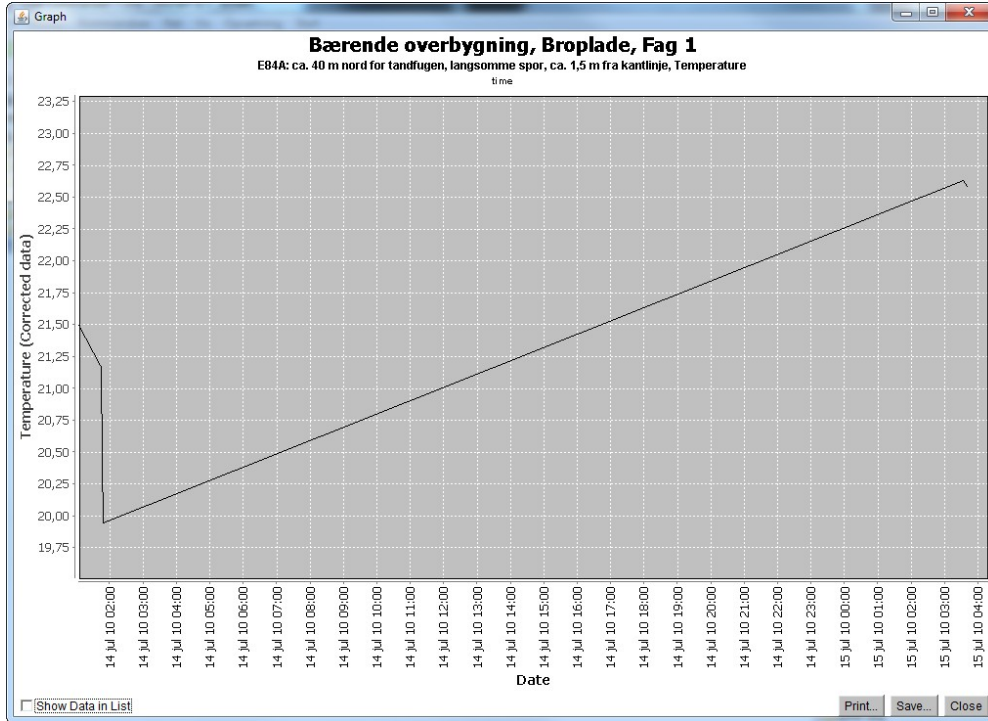


Foto 5: Bispeengbuen

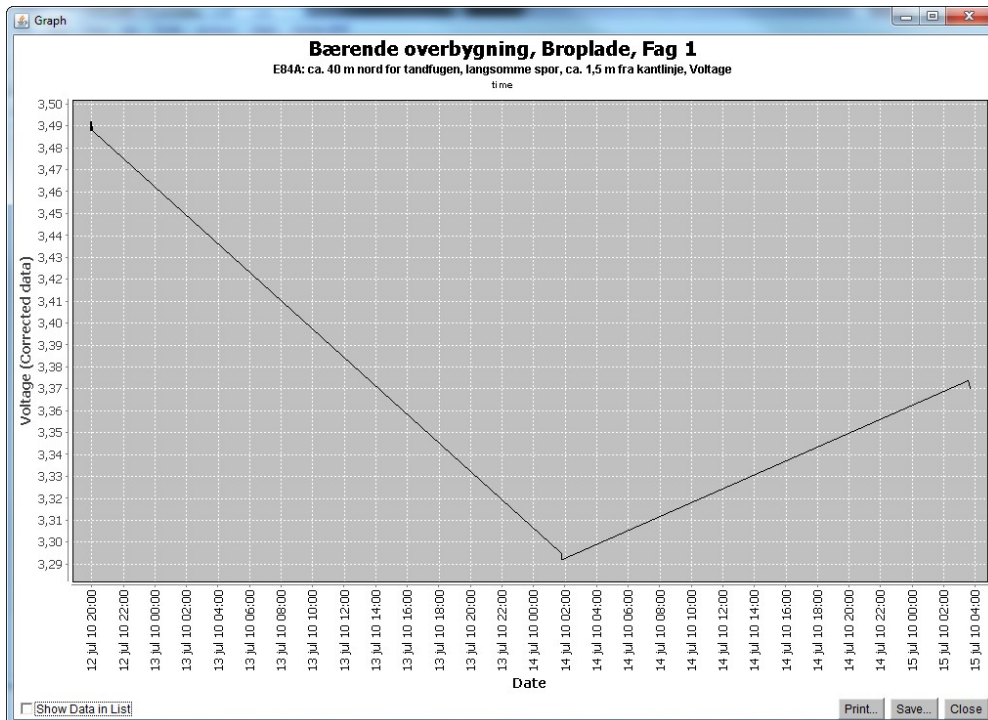


Foto 6: Bispeengbuen

[Vejdirektoratets broer]		Side: 4 af 27
Projekt: [7721025]	Dato: [Oktober 2010]	Init: [JTC]
Emne:	[Måledata for trådløse sensorer]	
Placering:		

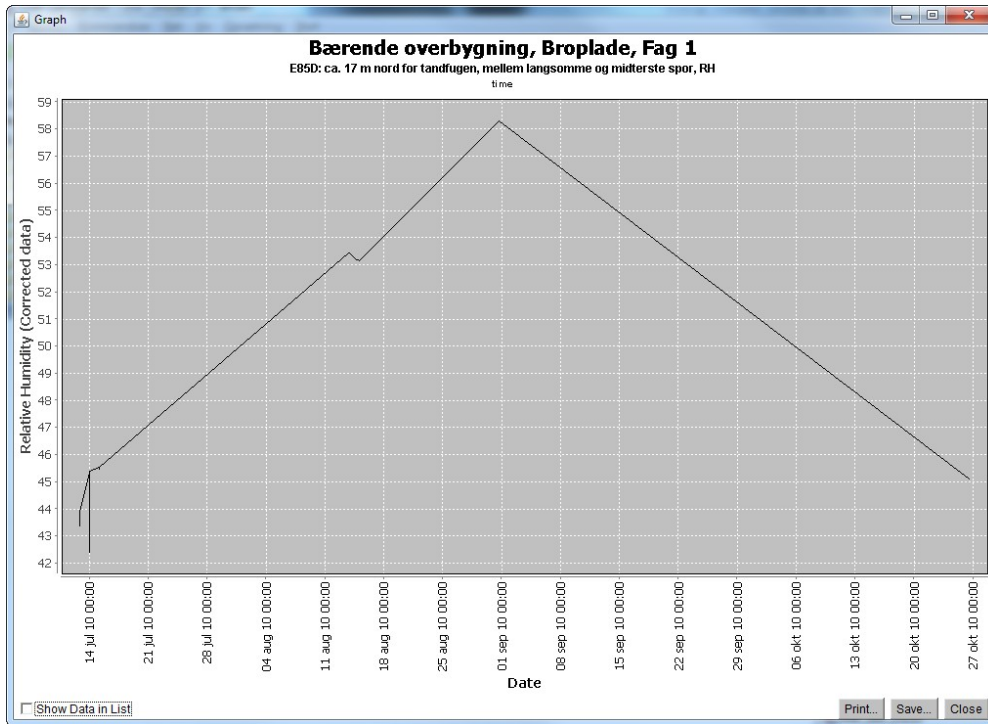


Foto 7: Bispeengbuen

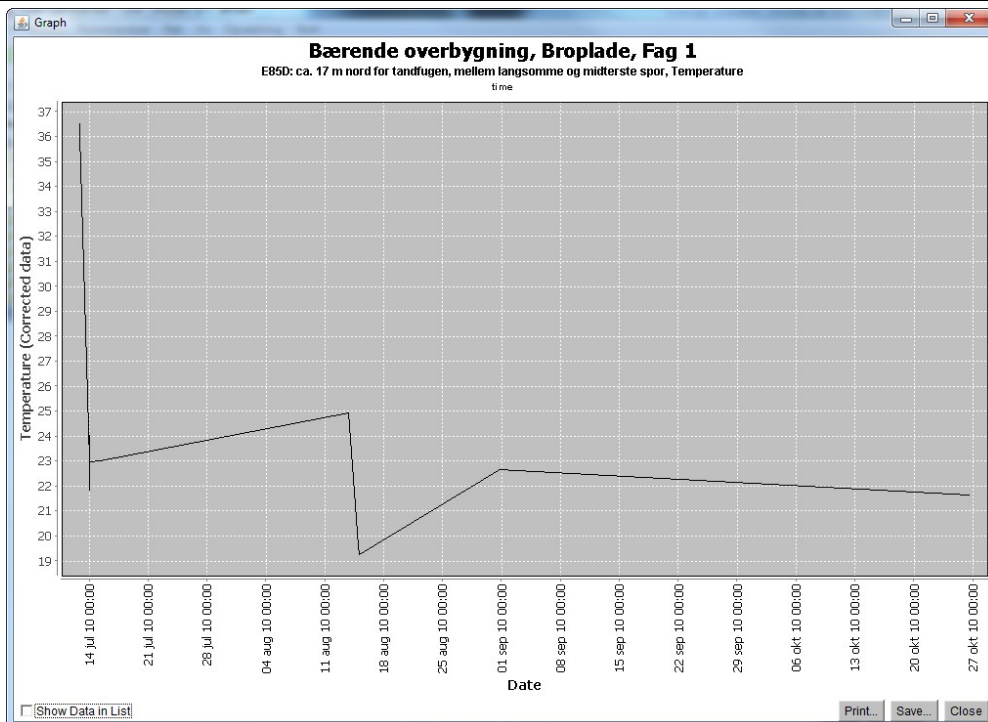


Foto 8: Bispeengbuen

[Vejdirektoratets broer]		Side: 5 af 27
Projekt: [7721025]	Dato: [Oktober 2010]	Init: [JTC]
Emne:	[Måledata for trådløse sensorer]	
Placering:		

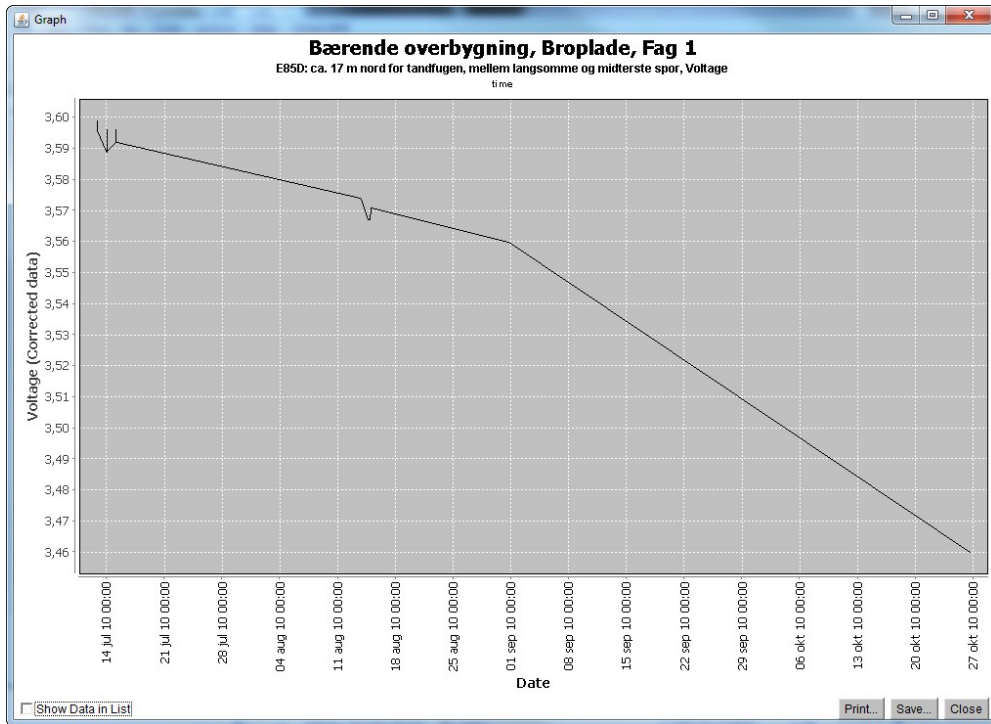


Foto 9: Bispeengbuen

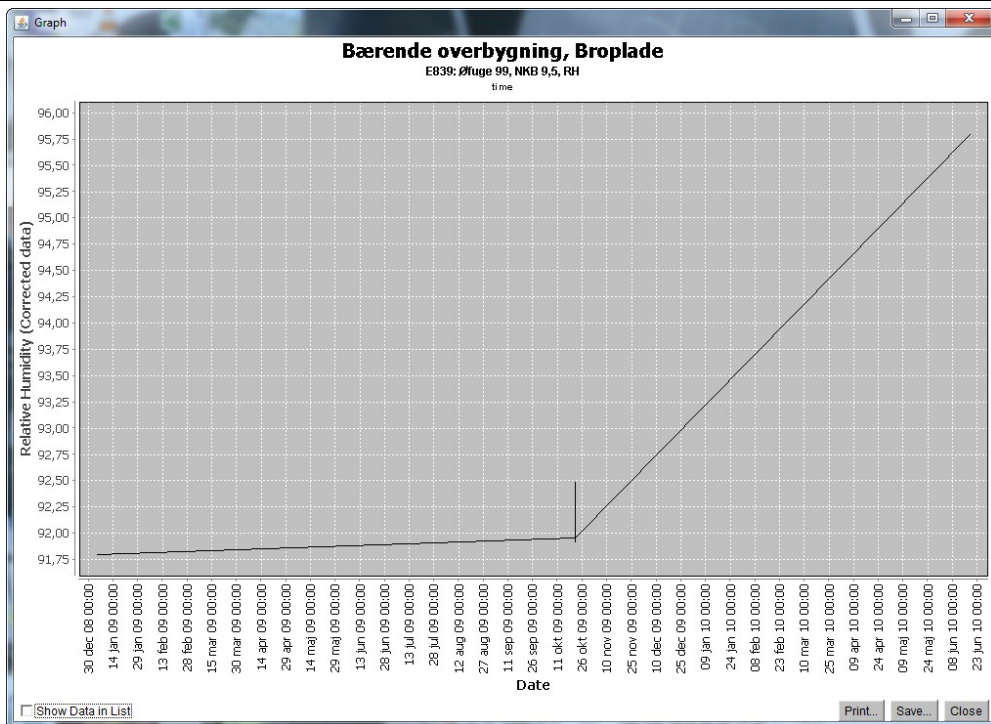


Foto 10: Borrevejle Vig Pæledæk

[Vejdirektoratets broer]		Side: 6 af 27
Projekt: [7721025]	Dato: [Oktober 2010]	Init: [JTC]
Emne:	[Måledata for trådløse sensorer]	
Placering:		

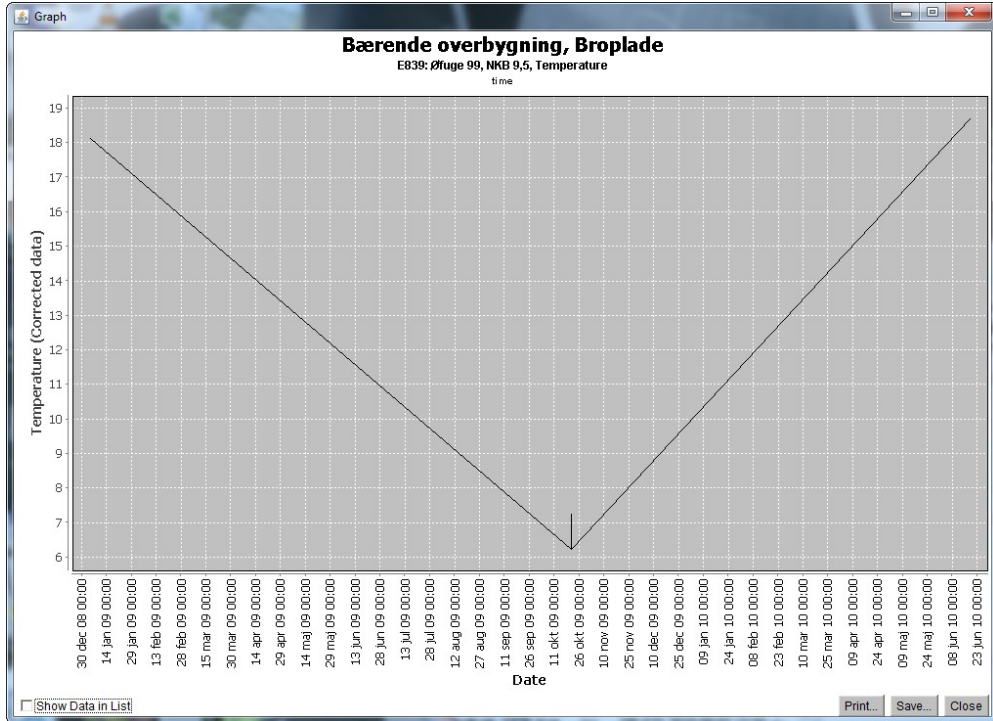


Foto 11: Borrevejle Vig Pæledæk

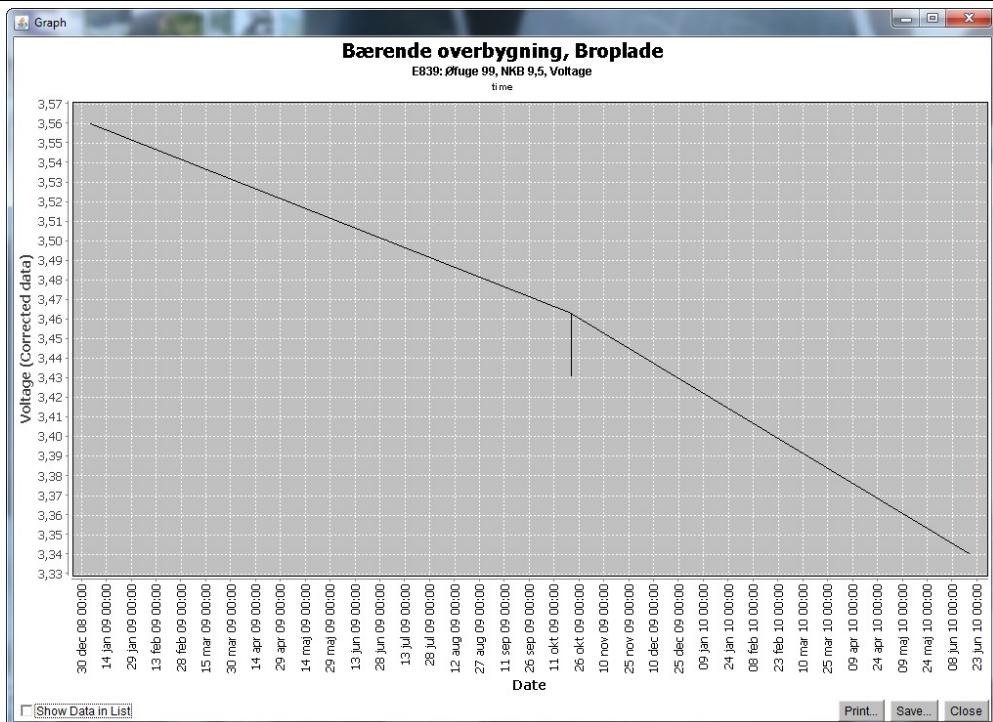


Foto 12: Borrevejle Vig Pæledæk

[Vejdirektoratets broer]		Side: 7 af 27
Projekt: [7721025]	Dato: [Oktober 2010]	Init: [JTC]
Emne:	[Måledata for trådløse sensorer]	
Placering:		

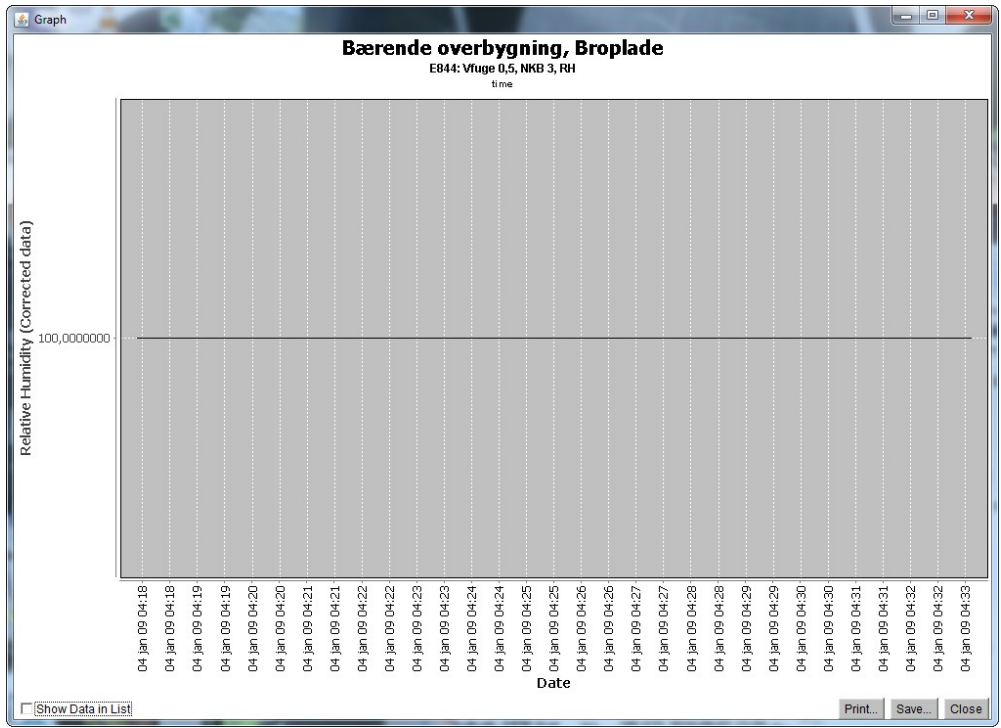


Foto 13: Borrevejle Vig Pæledæk

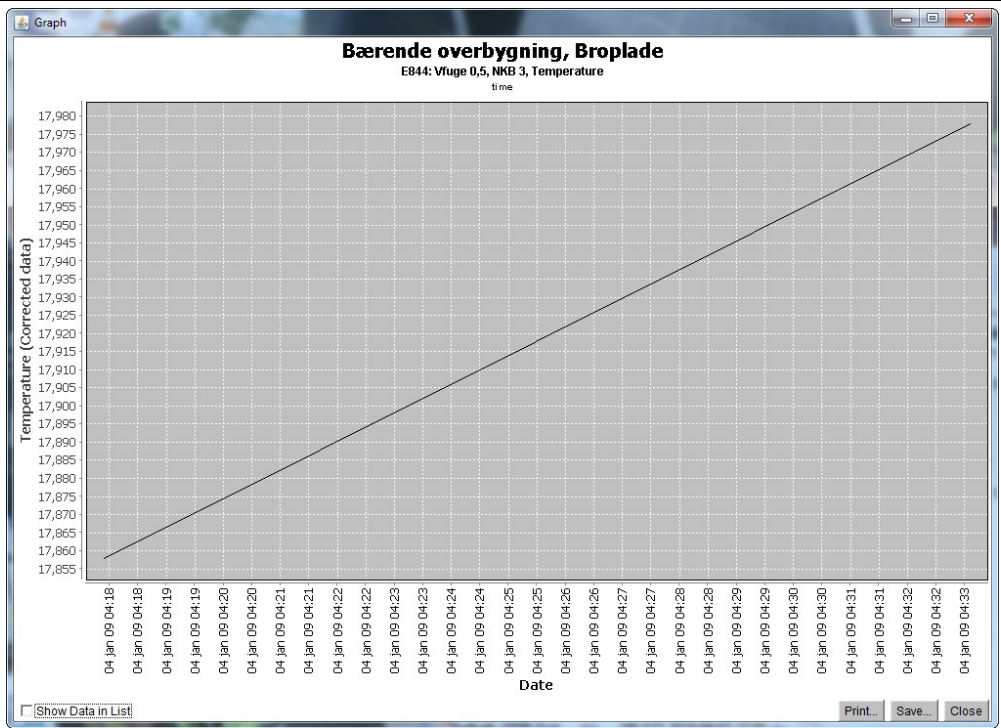


Foto 14: Borrevejle Vig Pæledæk

[Vejdirektoratets broer]		Side: 8 af 27
Projekt: [7721025]	Dato: [Oktober 2010]	Init: [JTC]
Emne:	[Måledata for trådløse sensorer]	
Placering:		

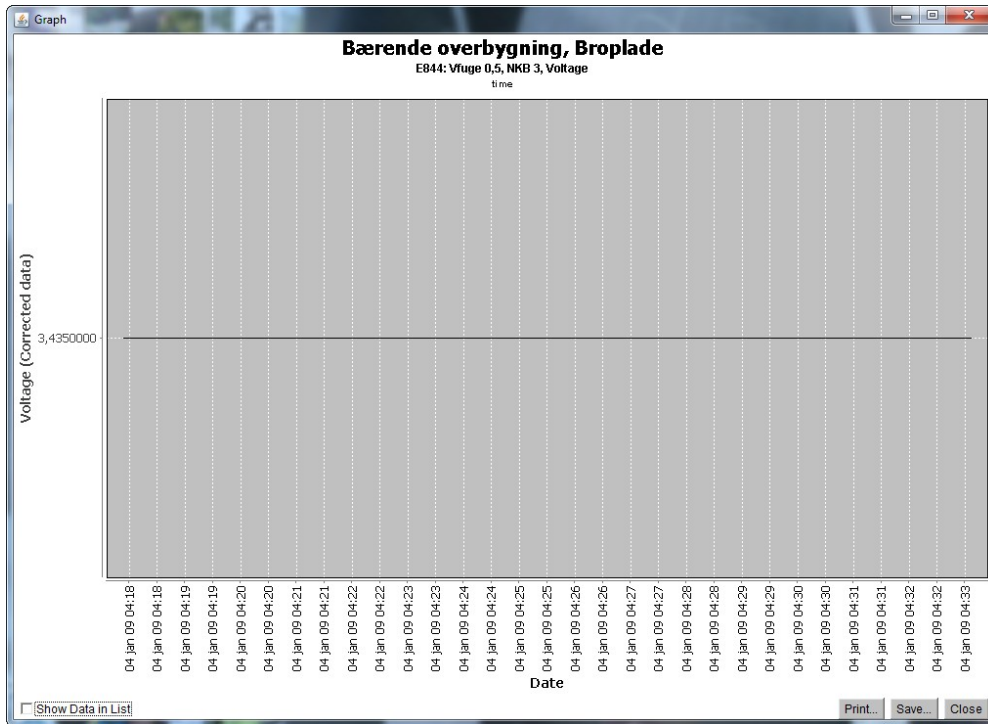


Foto 15: Borrevejle Vig Pæledæk

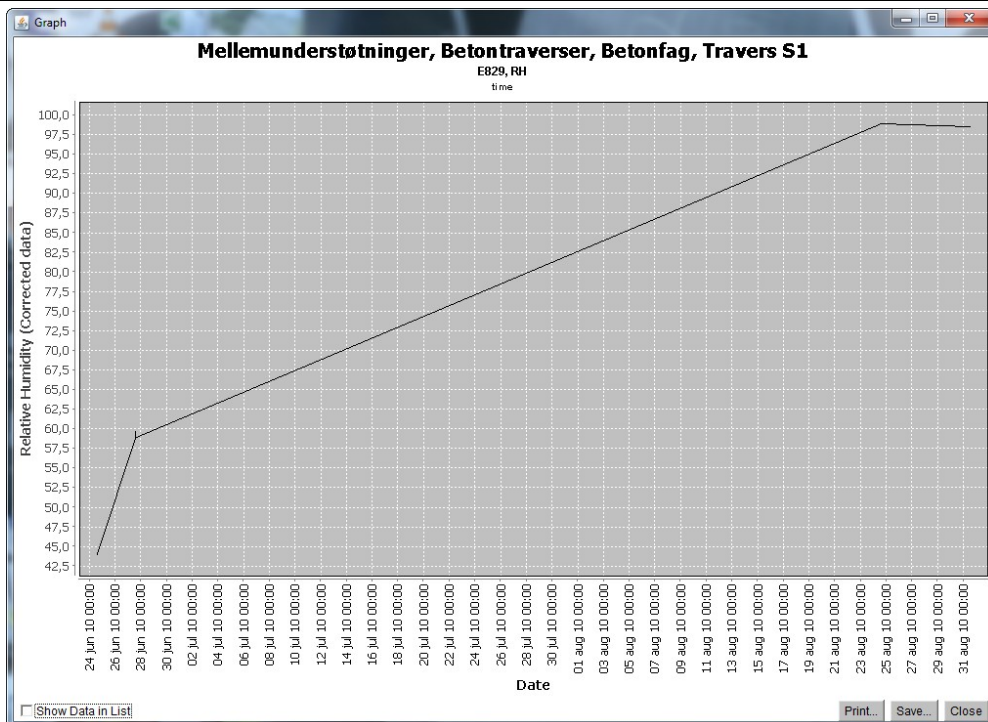


Foto 16: Fiskebækbroen, østbro

[Vejdirektoratets broer]		Side: 9 af 27
Projekt: [7721025]	Dato: [Oktober 2010]	Init: [JTC]
Emne:	[Måledata for trådløse sensorer]	
Placering:		

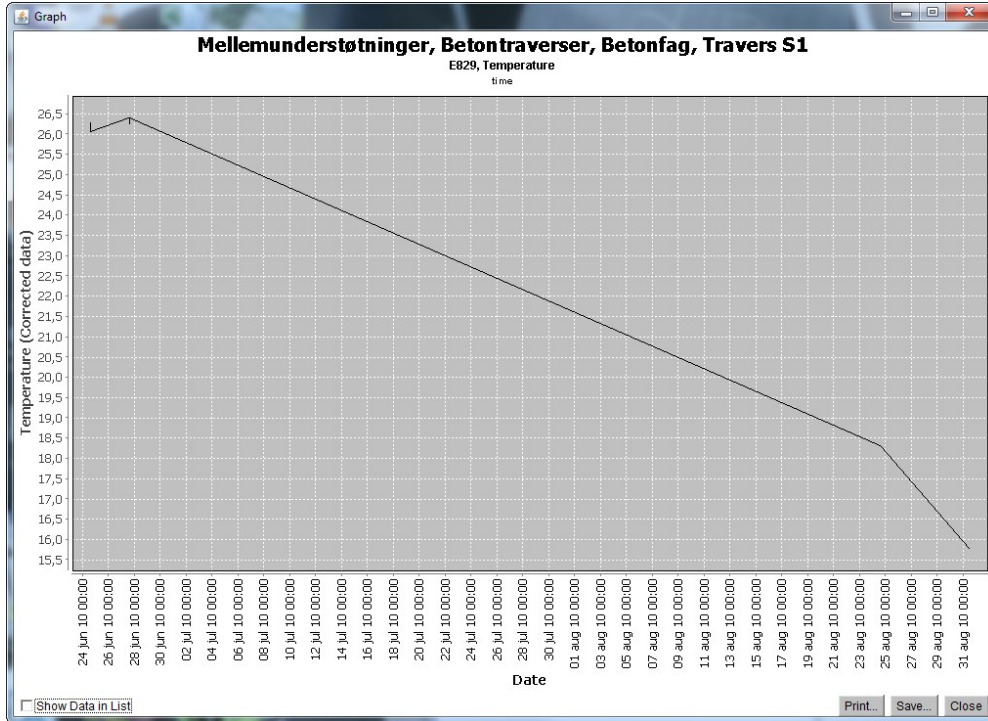


Foto 17: Fiskebækbroen, østbro

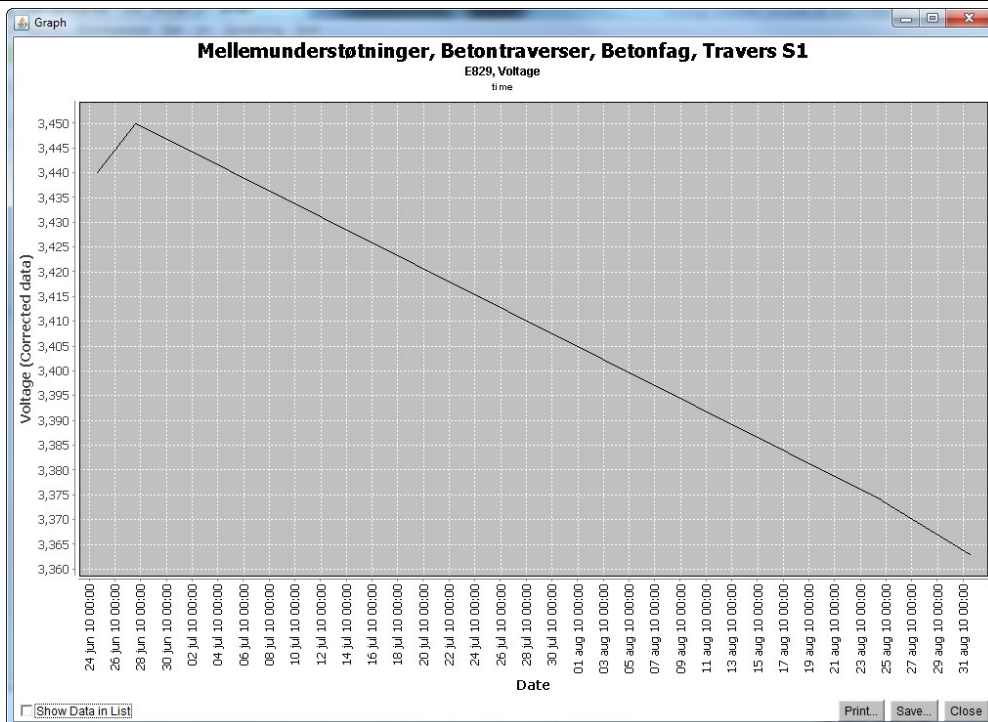


Foto 18: Fiskebækbroen, østbro

[Vejdirektoratets broer]		Side: 10 af 27
Projekt: [7721025]	Dato: [Oktober 2010]	Init: [JTC]
Emne:	[Måledata for trådløse sensorer]	
Placering:		

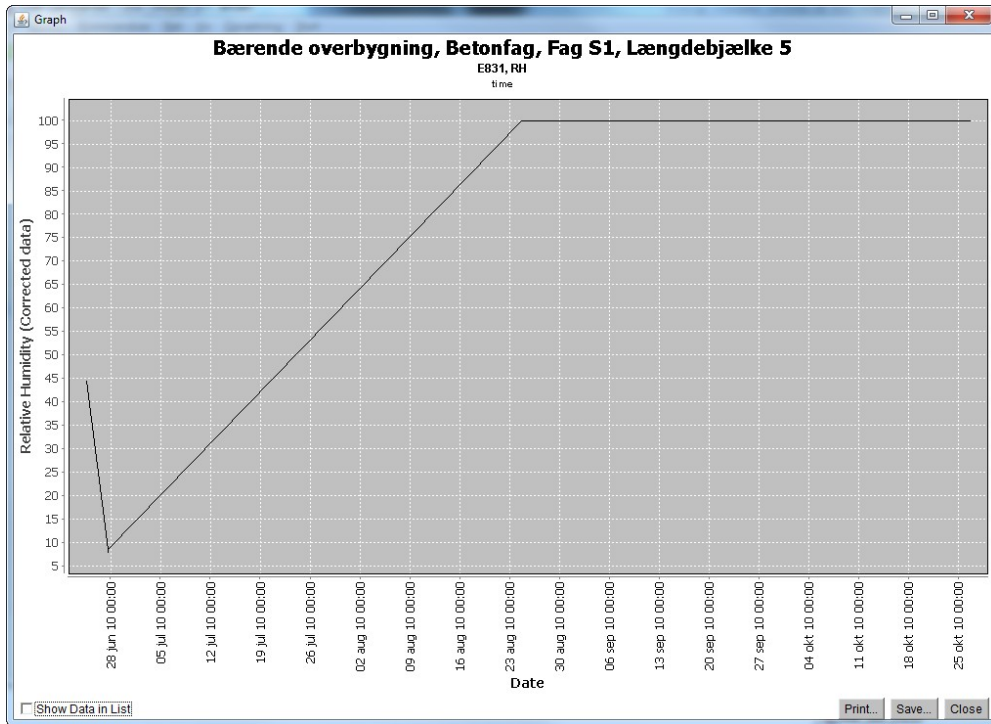


Foto 19: Fiskebækbroen, østbro

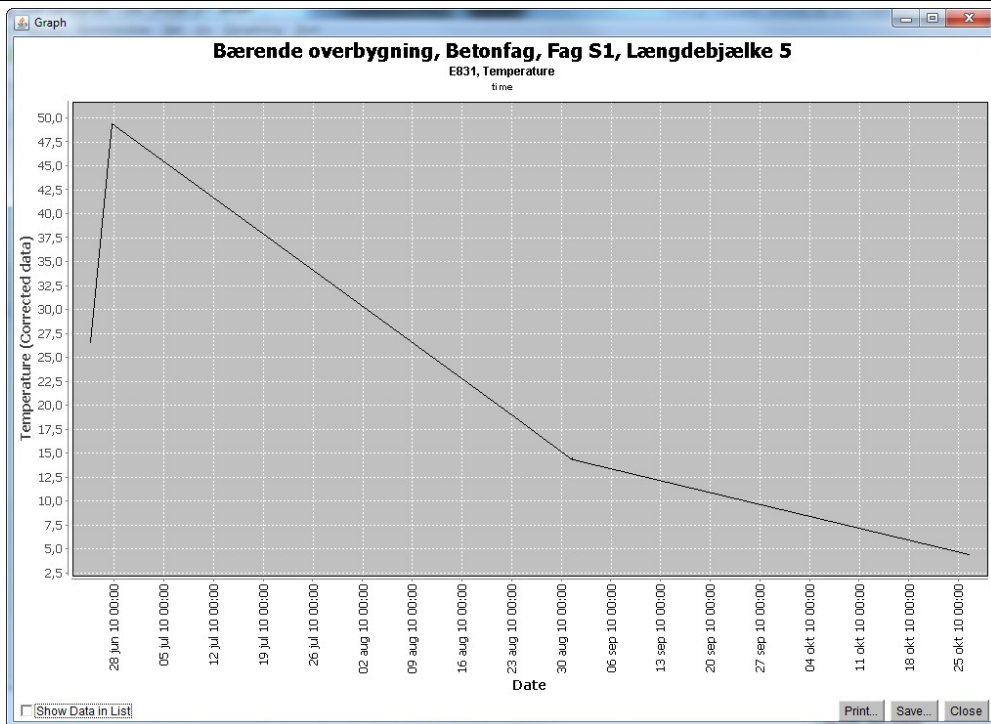


Foto 20: Fiskebækbroen, østbro

[Vejdirektoratets broer]		Side: 11 af 27
Projekt: [7721025]	Dato: [Oktober 2010]	Init: [JTC]
Emne:	[Måledata for trådløse sensorer]	
Placering:		

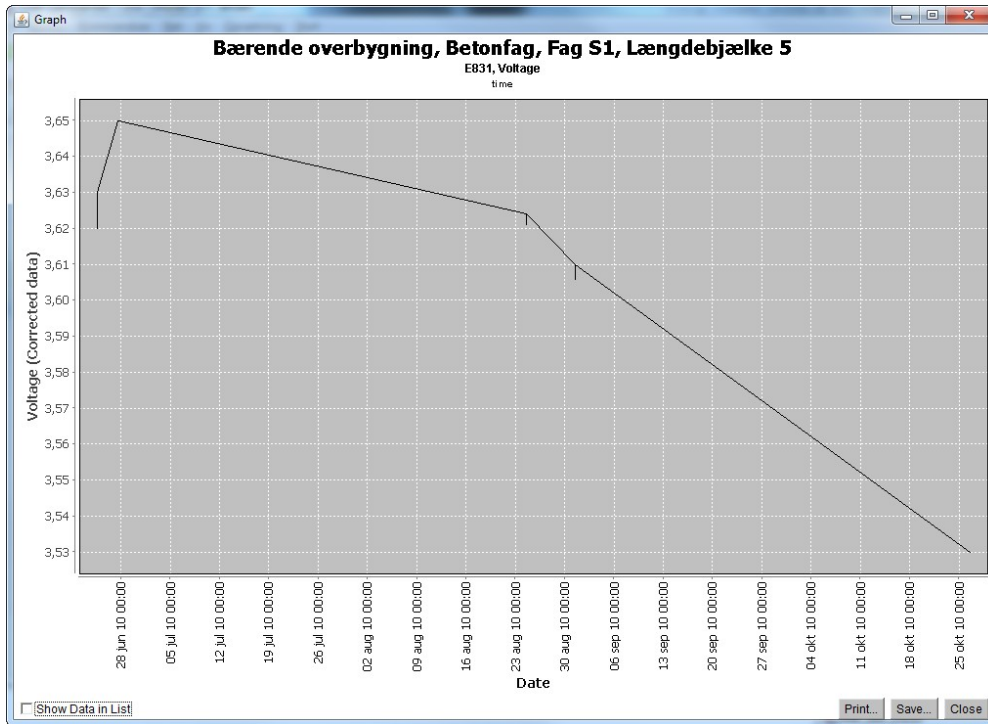


Foto 21: Fiskebækbroen, østbro

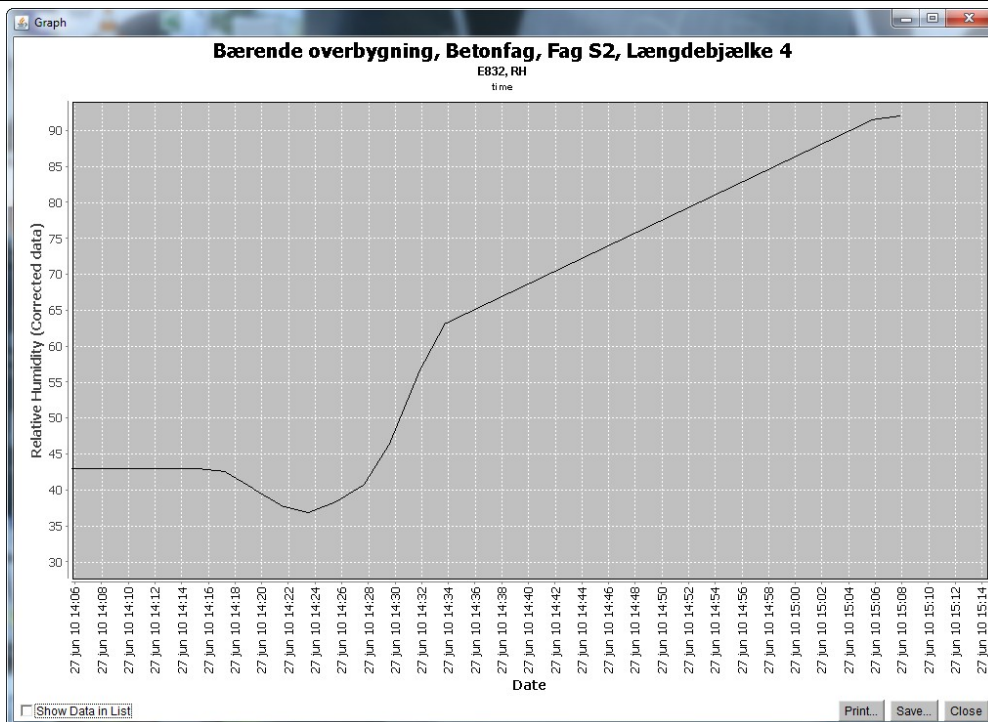


Foto 22: Fiskebækbroen, østbro

[Vejdirektoratets broer]		Side: 12 af 27
Projekt: [7721025]	Dato: [Oktober 2010]	Init: [JTC]
Emne:	[Måledata for trådløse sensorer]	
Placering:		

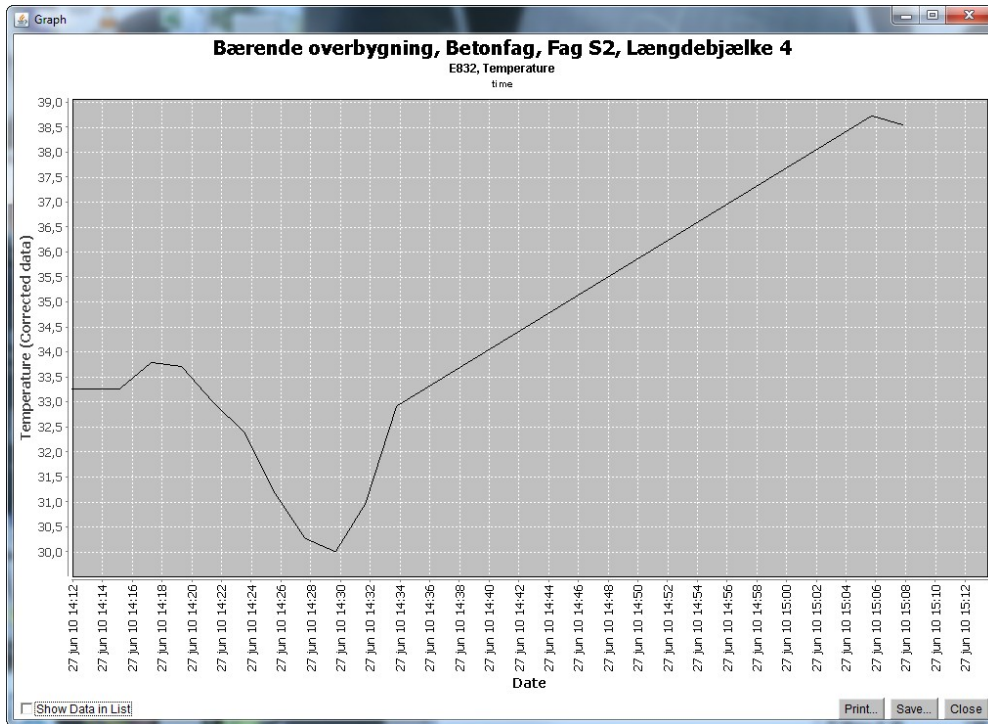


Foto 23: Fiskebækbroen, østbro

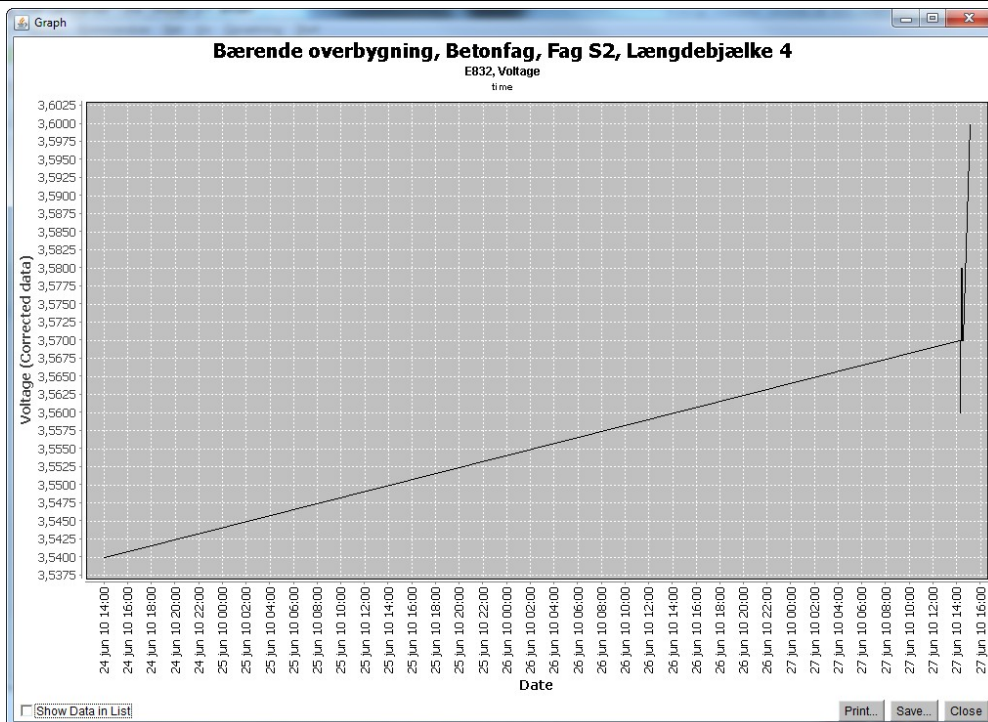


Foto 24: Fiskebækbroen, østbro

[Vejdirektoratets broer]		Side: 13 af 27
Projekt: [7721025]	Dato: [Oktober 2010]	Init: [JTC]
Emne:	[Måledata for trådløse sensorer]	
Placering:		

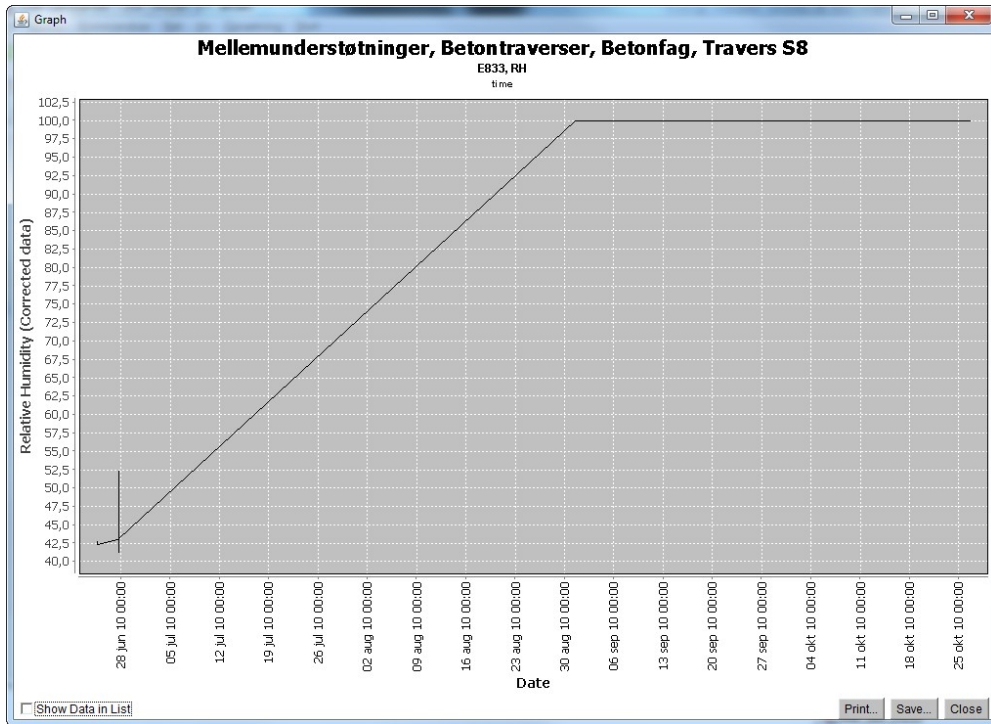


Foto 25: Fiskebækbroen, østbro

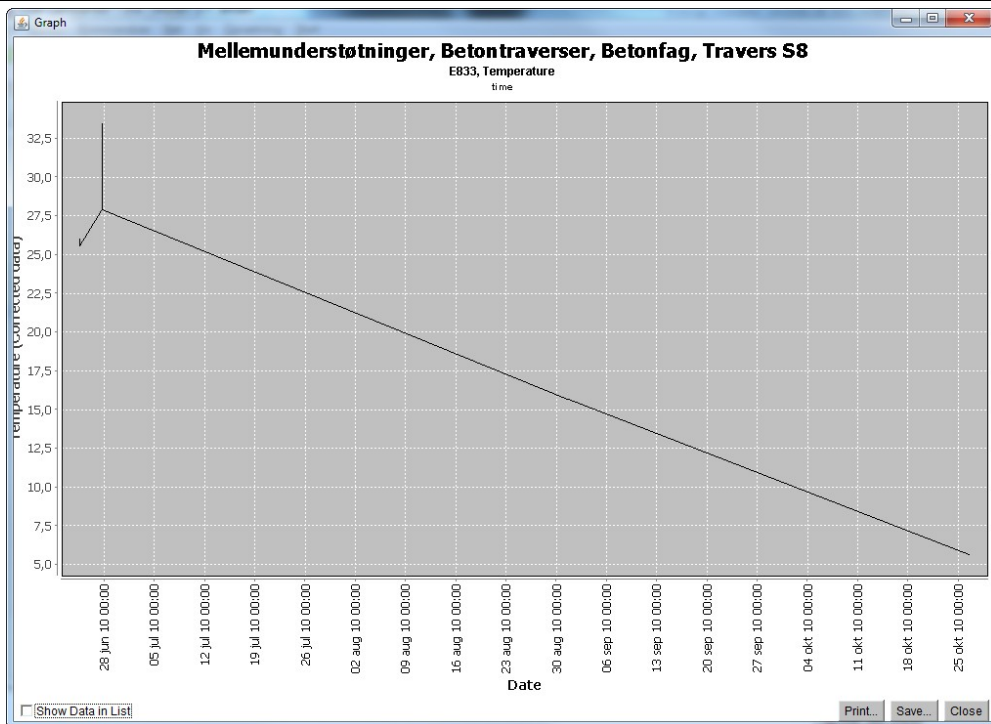


Foto 26: Fiskebækbroen, østbro

[Vejdirektoratets broer]		Side: 14 af 27
Projekt: [7721025]	Dato: [Oktober 2010]	Init: [JTC]
Emne:	[Måledata for trådløse sensorer]	
Placering:		

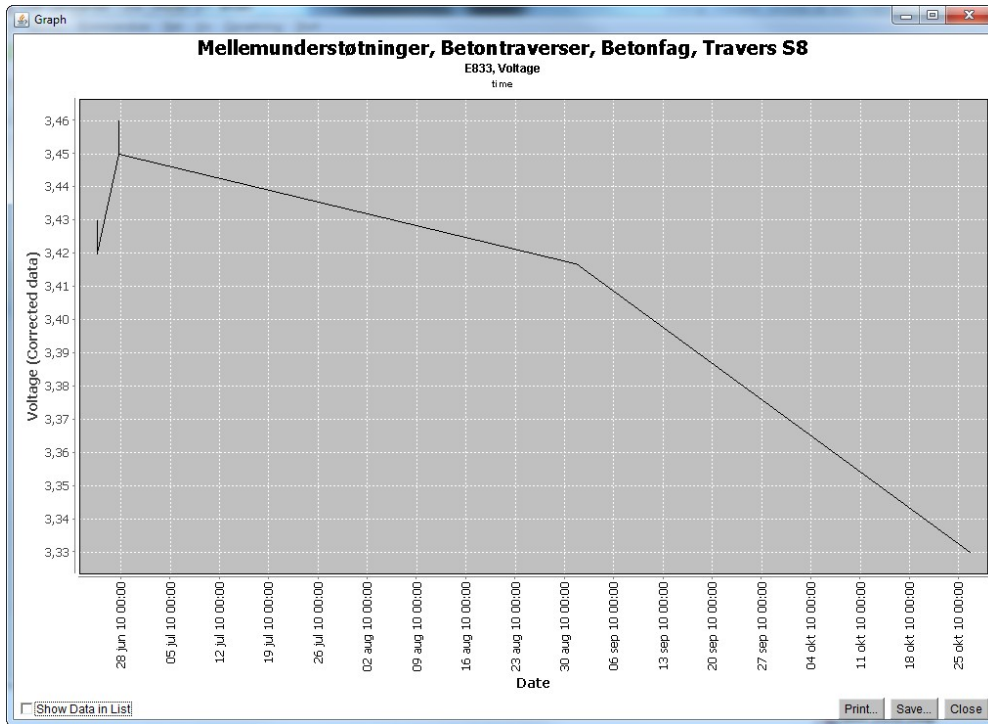


Foto 27: Fiskebækbroen, østbro

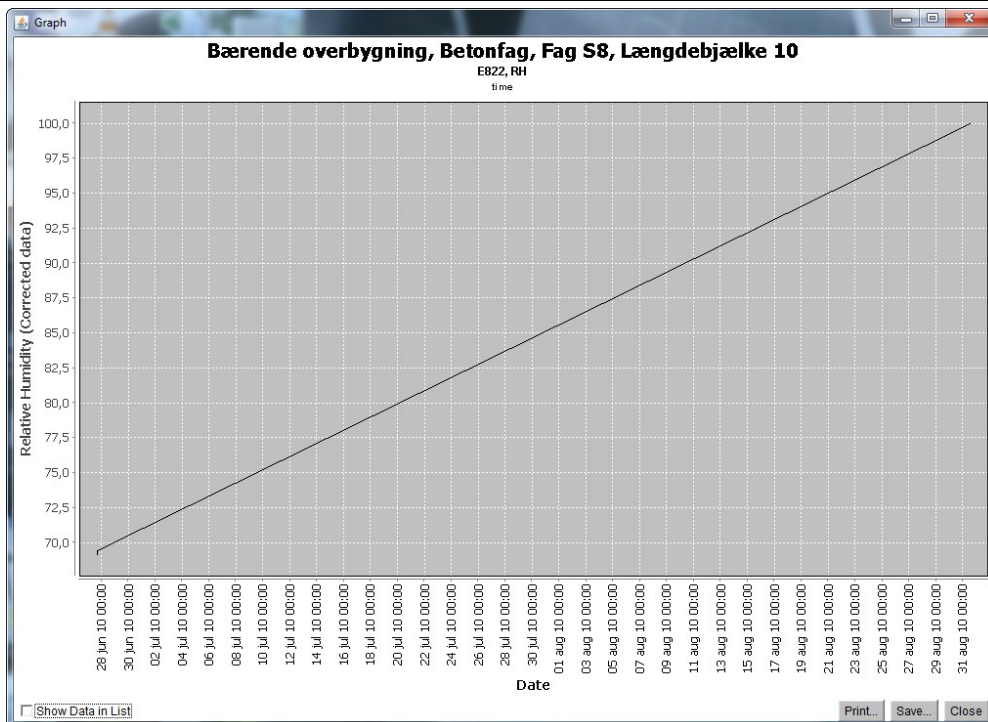


Foto 28: Fiskebækbroen, vestbro

[Vejdirektoratets broer]		Side: 15 af 27
Projekt: [7721025]	Dato: [Oktober 2010]	Init: [JTC]
Emne:	[Måledata for trådløse sensorer]	
Placering:		

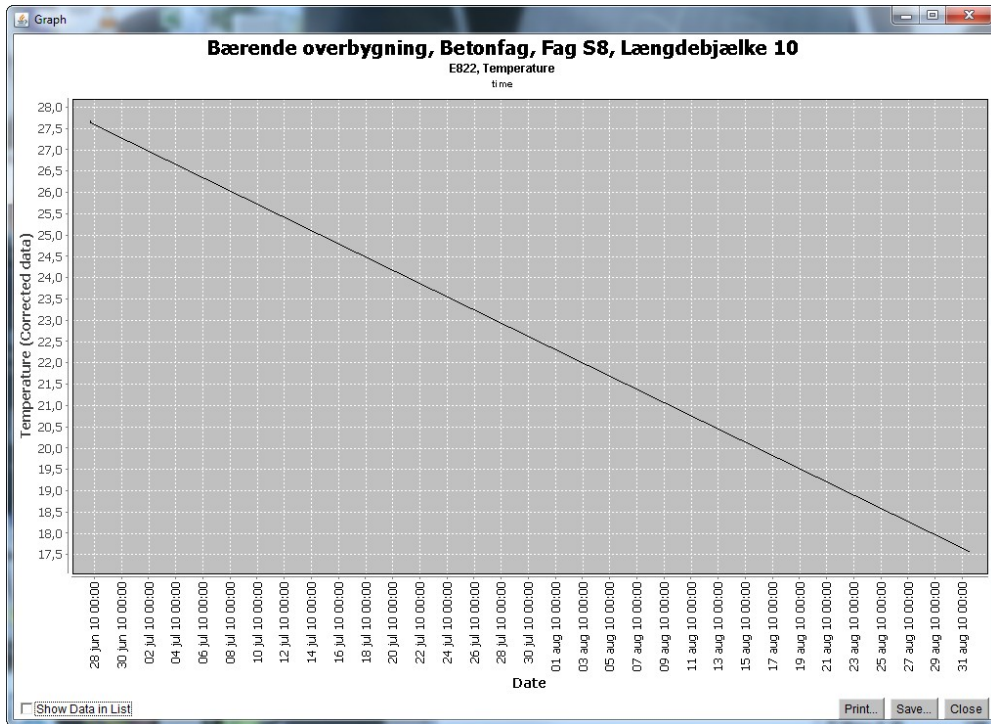


Foto 29: Fiskebækbroen, vestbro

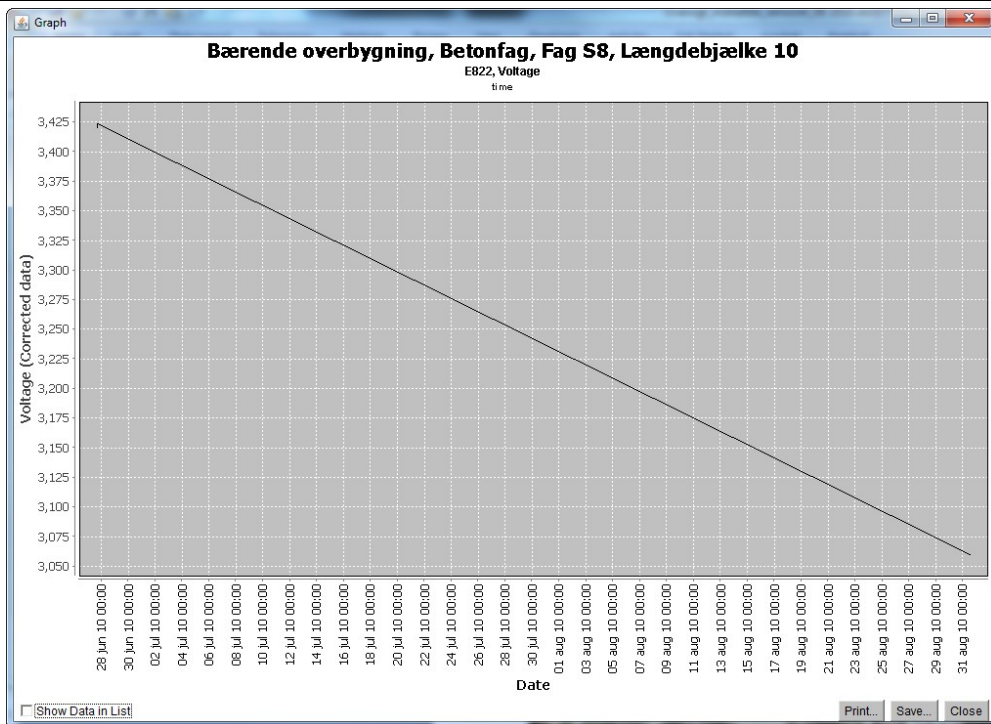


Foto 30: Fiskebækbroen, vestbro

[Vejdirektoratets broer]		Side: 16 af 27
Projekt: [7721025]	Dato: [Oktober 2010]	Init: [JTC]
Emne:	[Måledata for trådløse sensorer]	
Placering:		

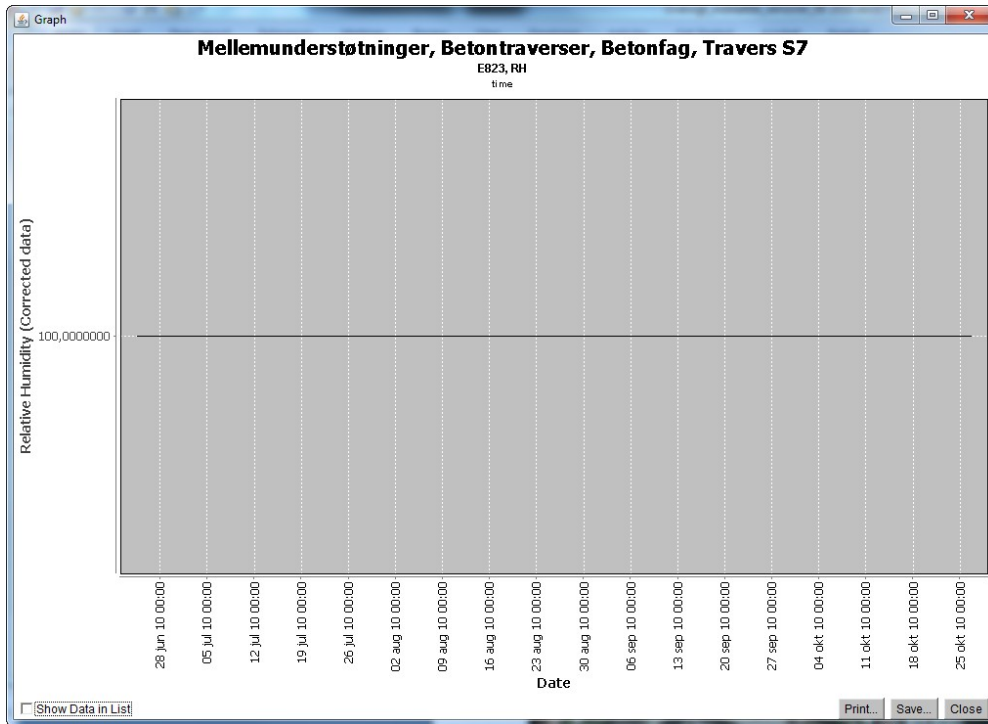


Foto 31: Fiskebækbroen, vestbro

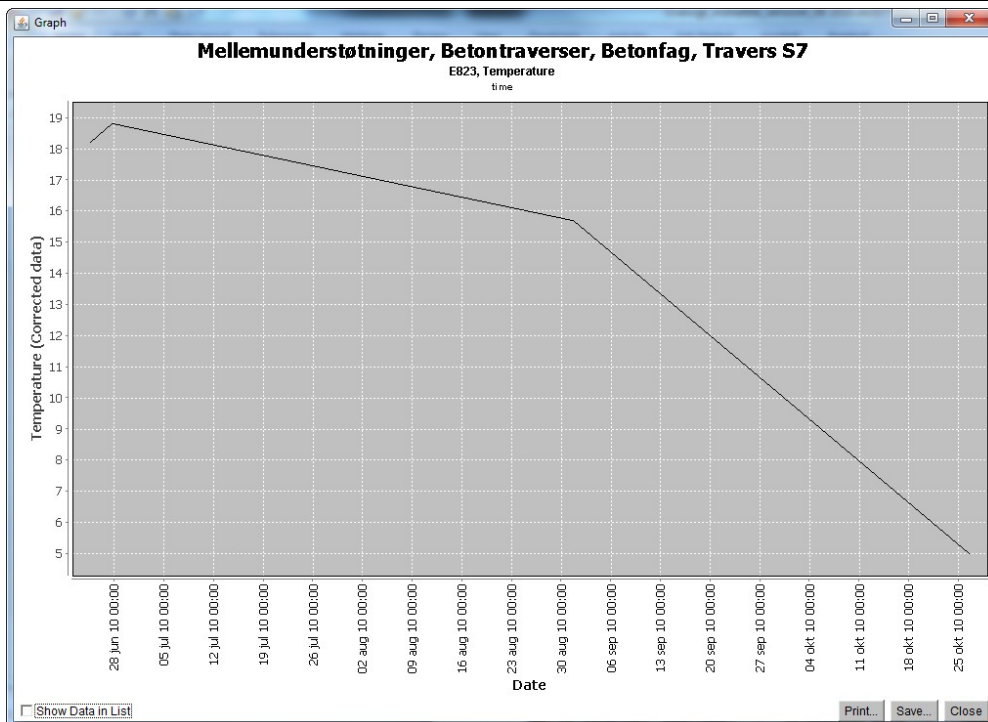


Foto 32: Fiskebækbroen, vestbro

[Vejdirektoratets broer]		Side: 17 af 27
Projekt: [7721025]	Dato: [Oktober 2010]	Init: [JTC]
Emne:	[Måledata for trådløse sensorer]	
Placering:		

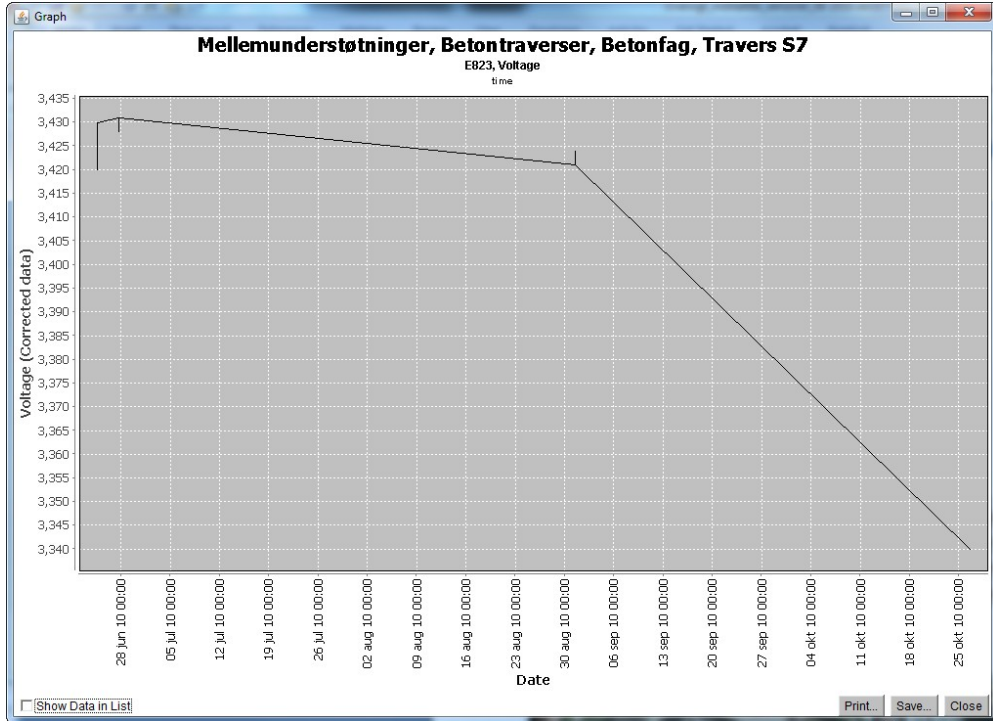


Foto 33: Fiskebækbroen, vestbro

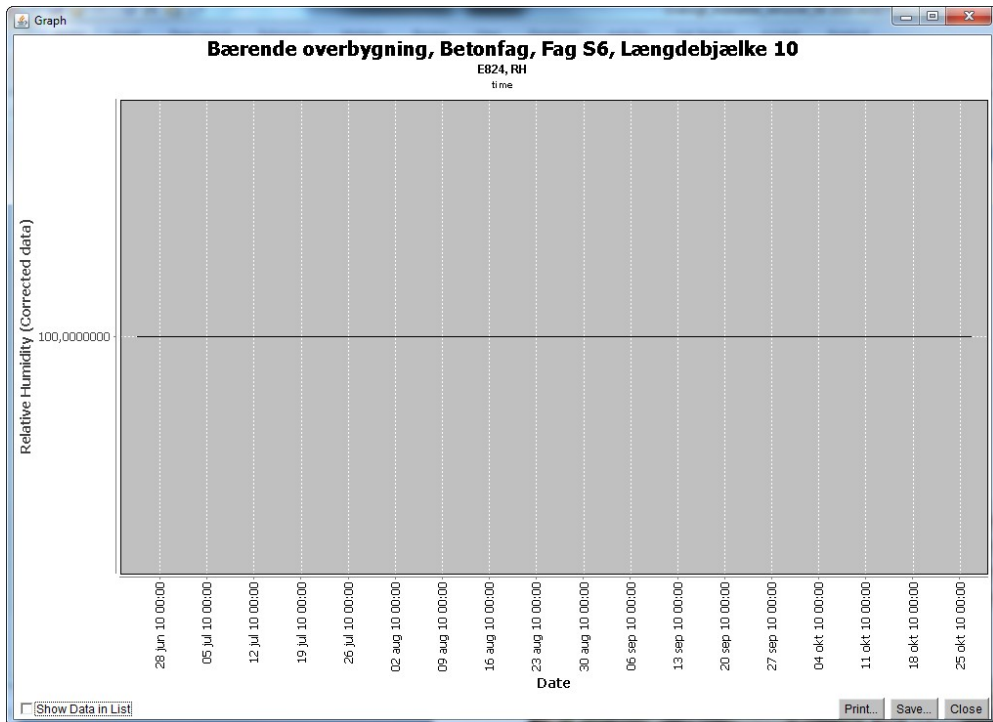


Foto 34: Fiskebækbroen, vestbro

[Vejdirektoratets broer]		Side: 18 af 27
Projekt: [7721025]	Dato: [Oktober 2010]	Init: [JTC]
Emne:	[Måledata for trådløse sensorer]	
Placering:		

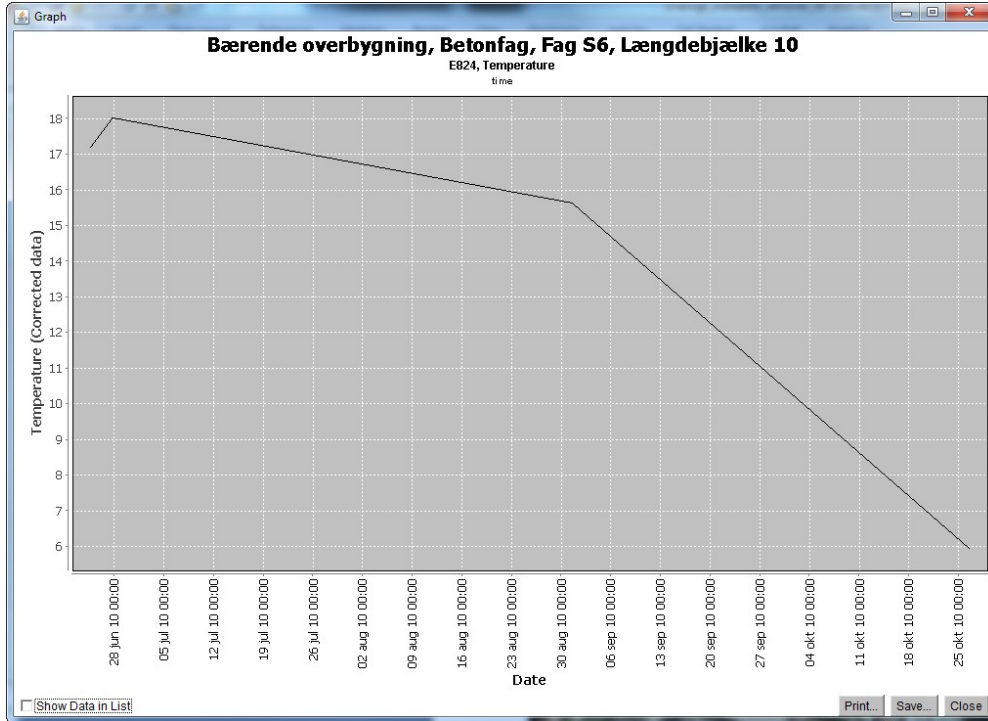


Foto 35: Fiskebækbroen, vestbro

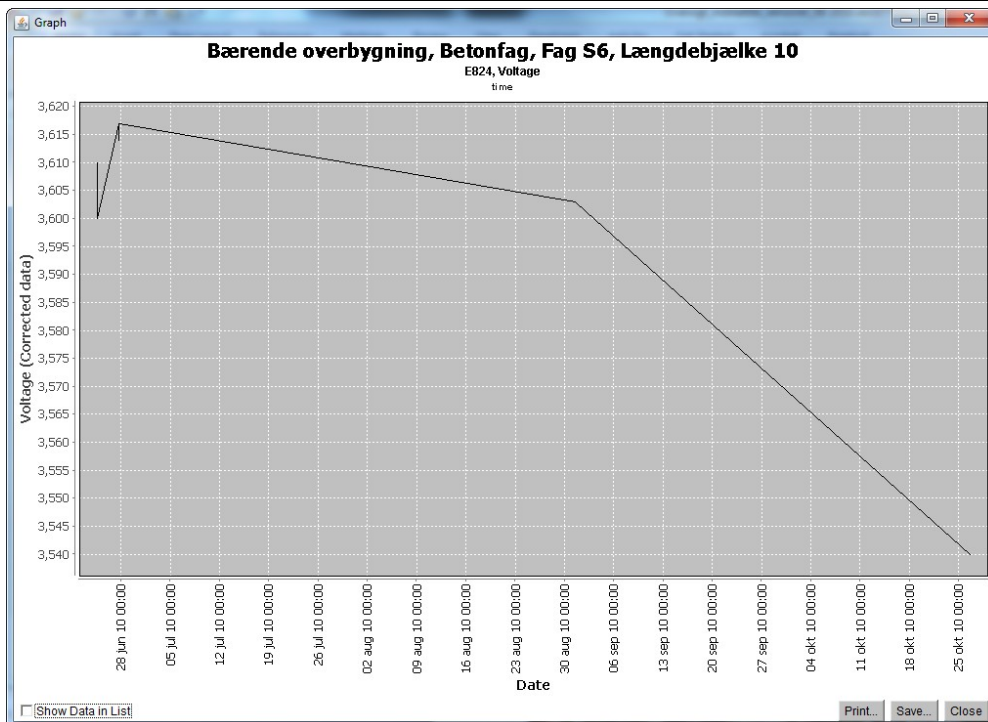


Foto 36: Fiskebækbroen, vestbro

[Vejdirektoratets broer]		Side: 19 af 27
Projekt: [7721025]	Dato: [Oktober 2010]	Init: [JTC]
Emne:	[Måledata for trådløse sensorer]	
Placering:		

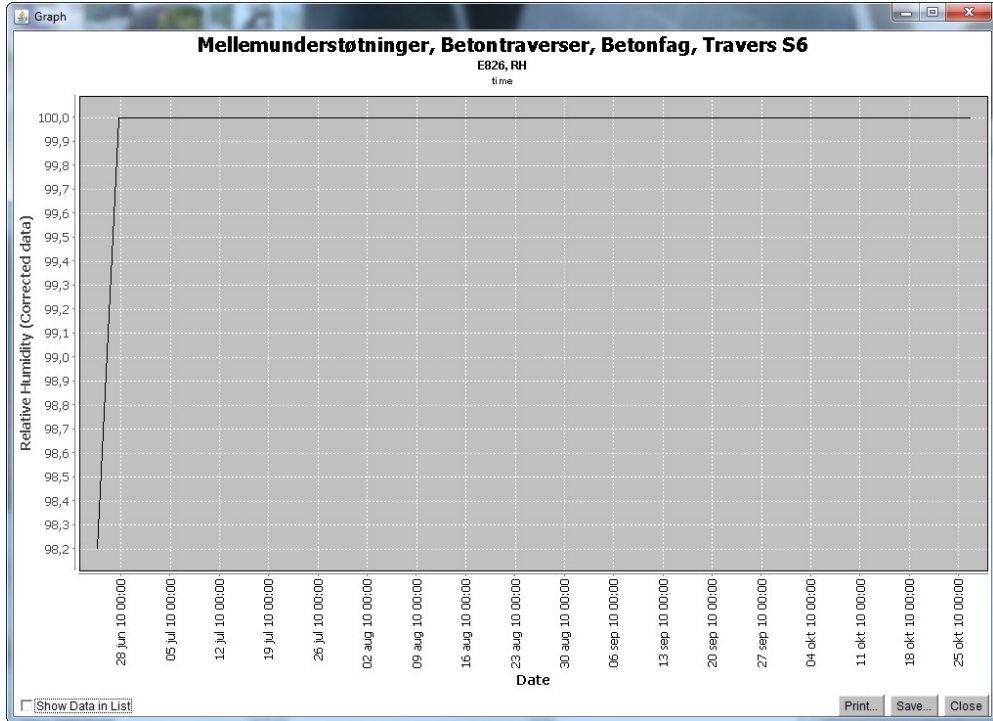


Foto 37: Fiskebækbroen, vestbro

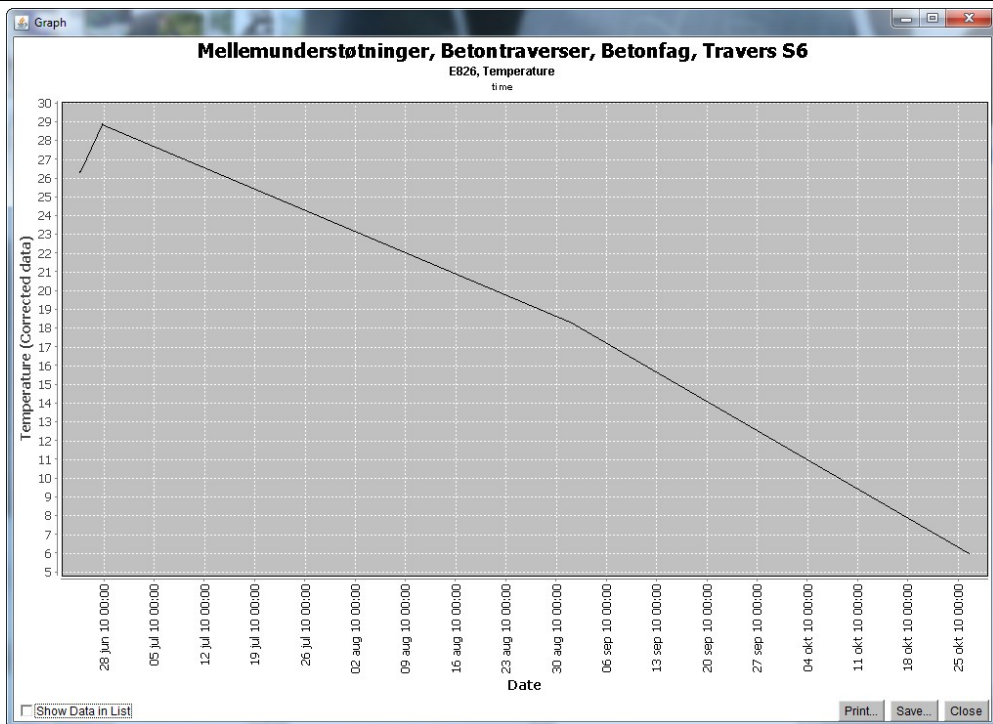


Foto 38: Fiskebækbroen, vestbro

[Vejdirektoratets broer]		Side: 20 af 27
Projekt: [7721025]	Dato: [Oktober 2010]	Init: [JTC]
Emne:	[Måledata for trådløse sensorer]	
Placering:		

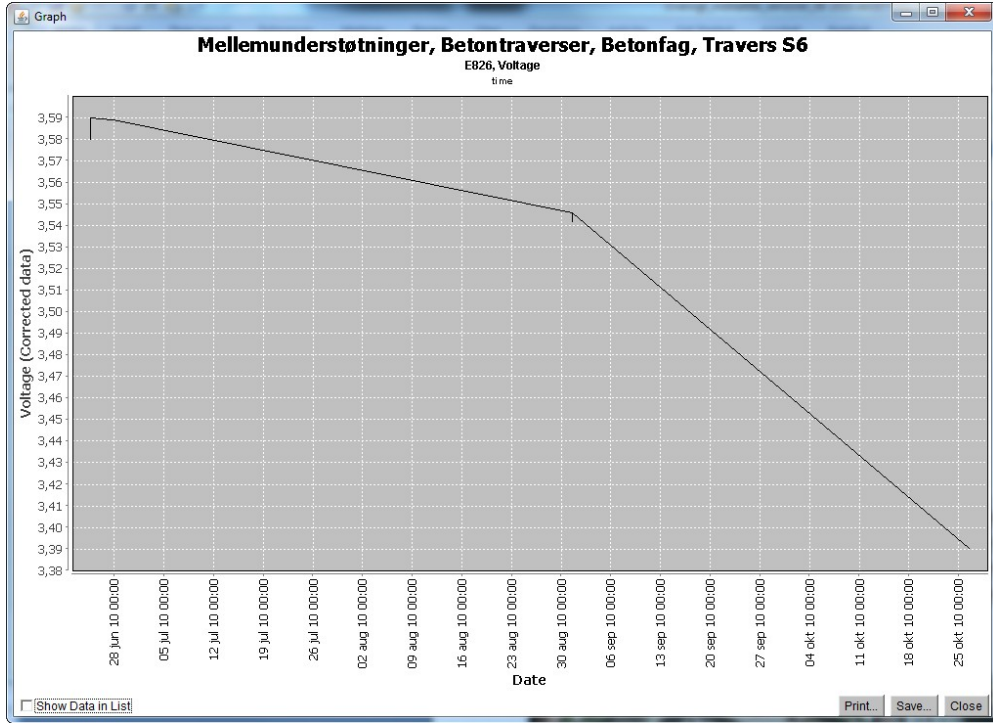


Foto 39: Fiskebækbroen, vestbro

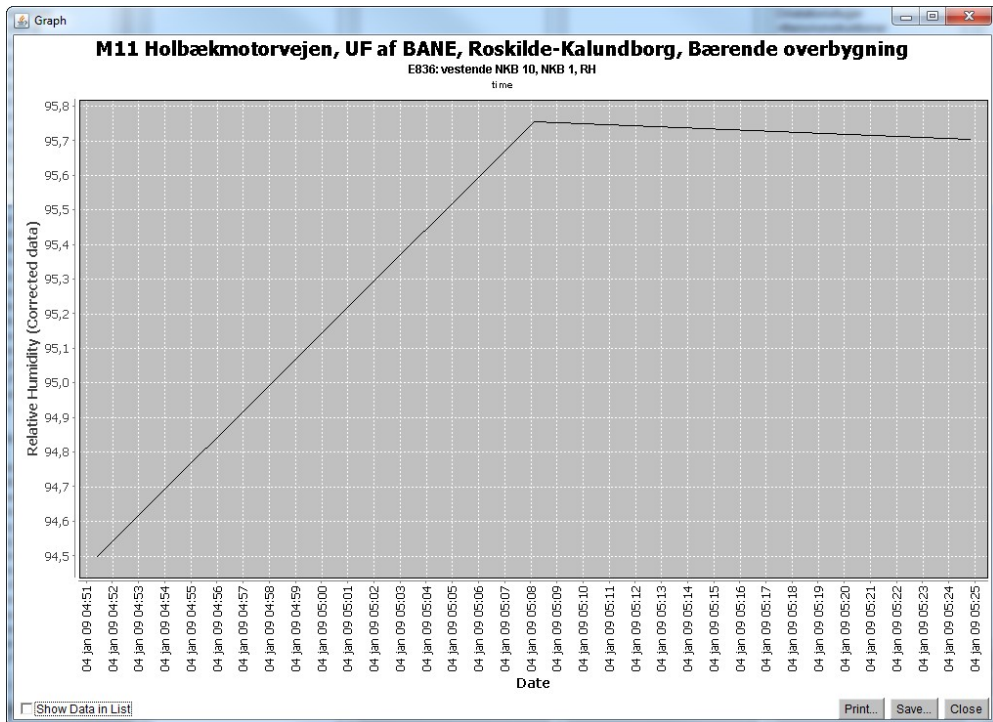


Foto 40: UF Bane, Holbækmotorvejen

[Vejdirektoratets broer]		Side: 21 af 27
Projekt: [7721025]	Dato: [Oktober 2010]	Init: [JTC]
Emne:	[Måledata for trådløse sensorer]	
Placering:		

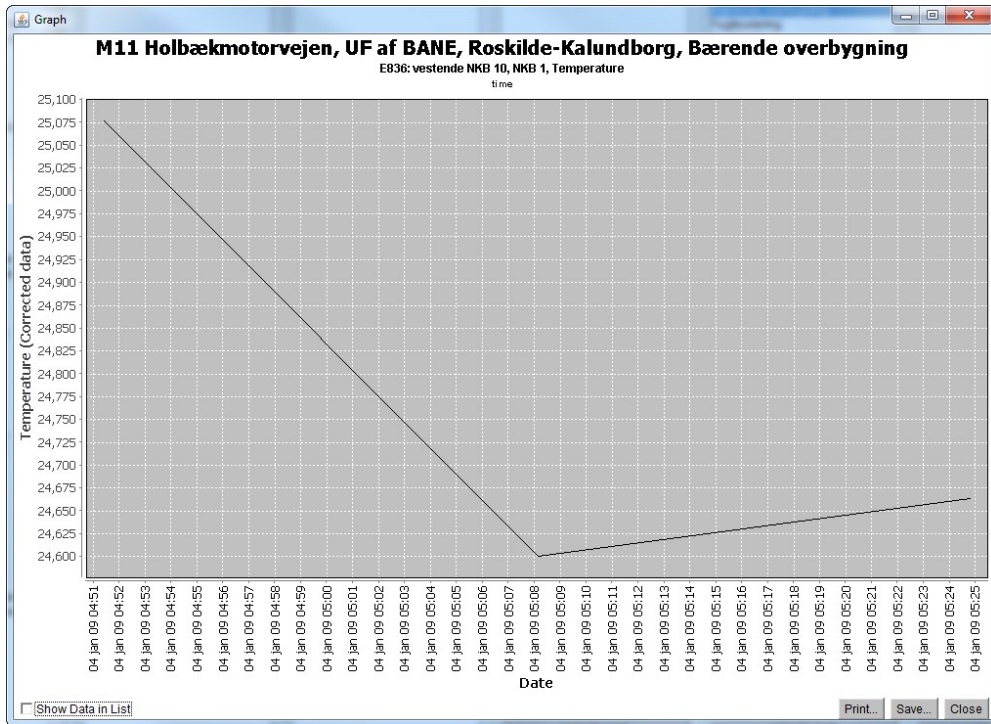


Foto 41: UF Bane, Holbækmotorvejen

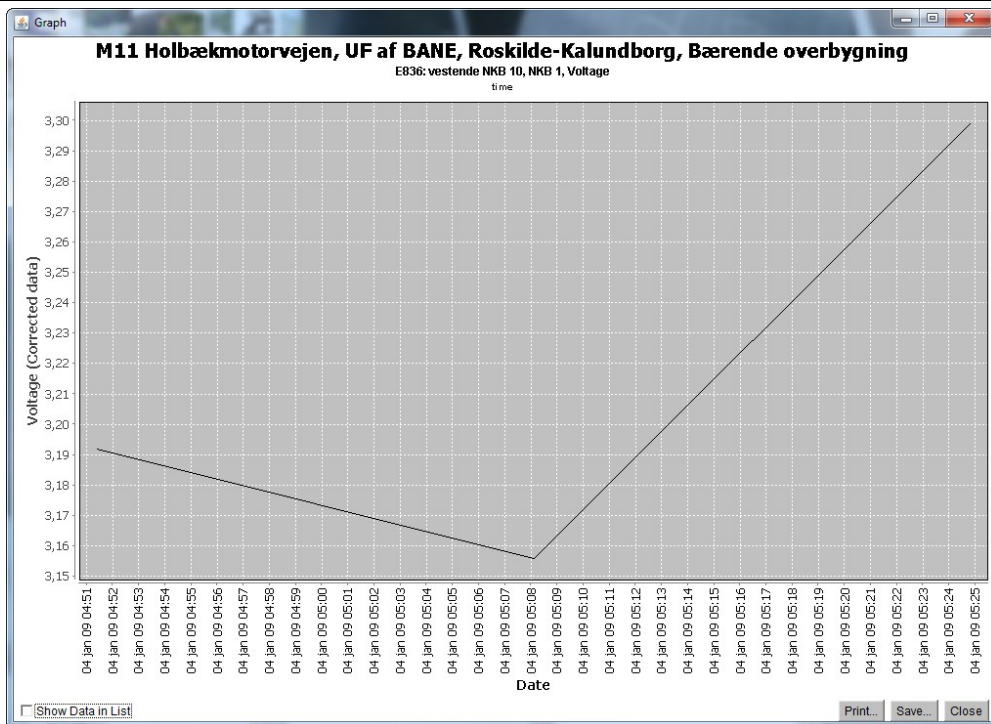


Foto 42: UF Bane, Holbækmotorvejen

[Vejdirektoratets broer]		Side: 22 af 27
Projekt: [7721025]	Dato: [Oktober 2010]	Init: [JTC]
Emne:	[Måledata for trådløse sensorer]	
Placering:		

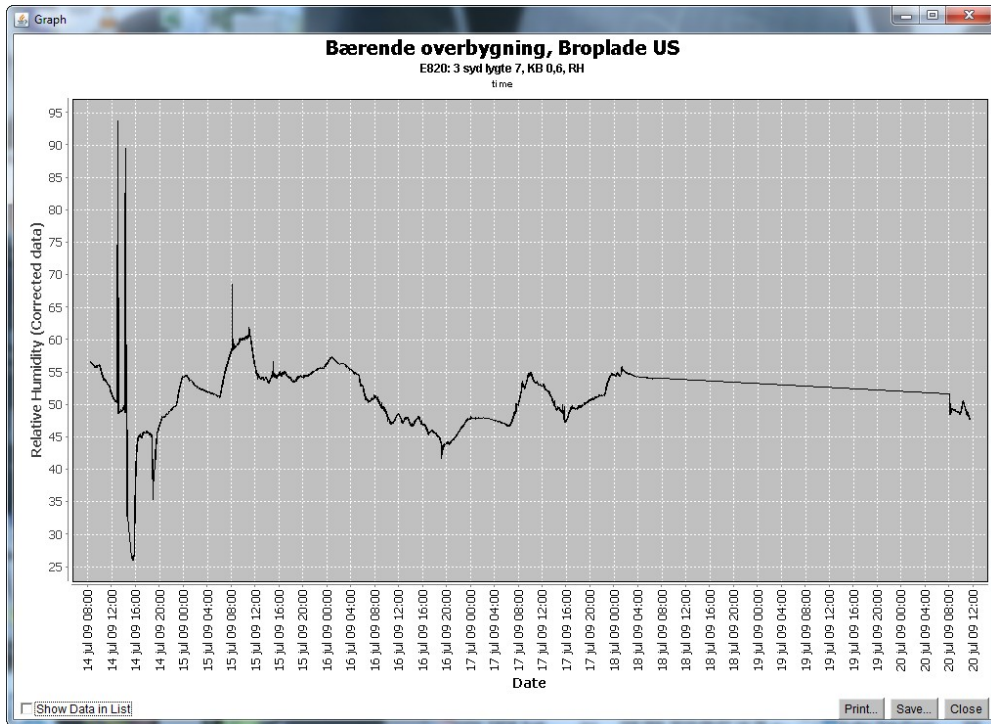


Foto 43: Skovdiget, østbro

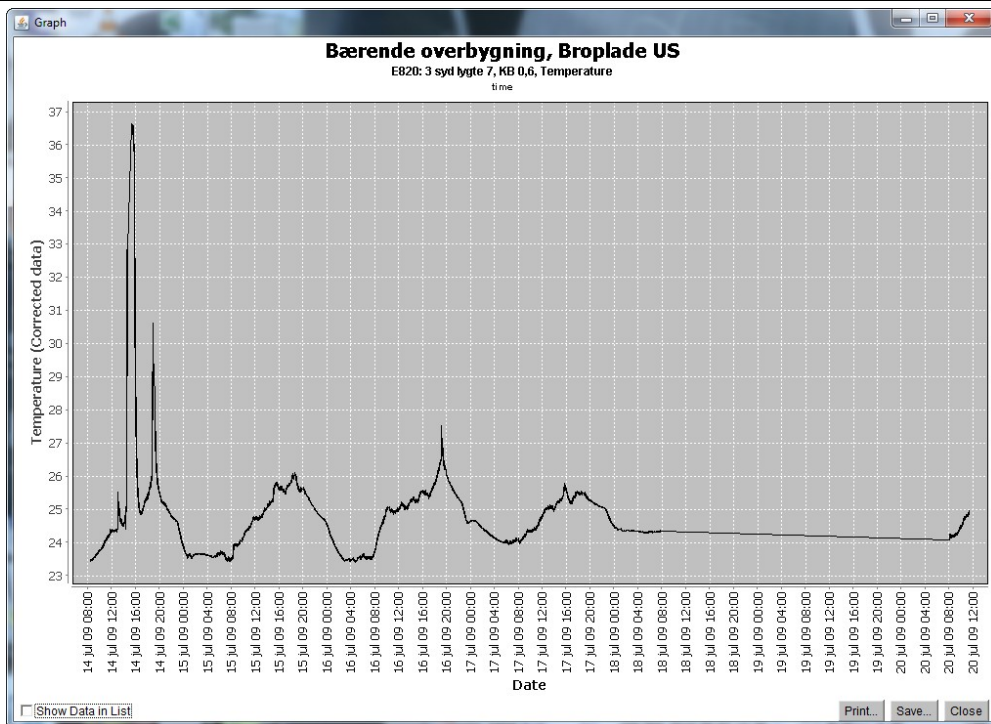


Foto 44: Skovdiget, østbro

[Vejdirektoratets broer]		Side: 23 af 27
Projekt: [7721025]	Dato: [Oktober 2010]	Init: [JTC]
Emne:	[Måledata for trådløse sensorer]	
Placering:		

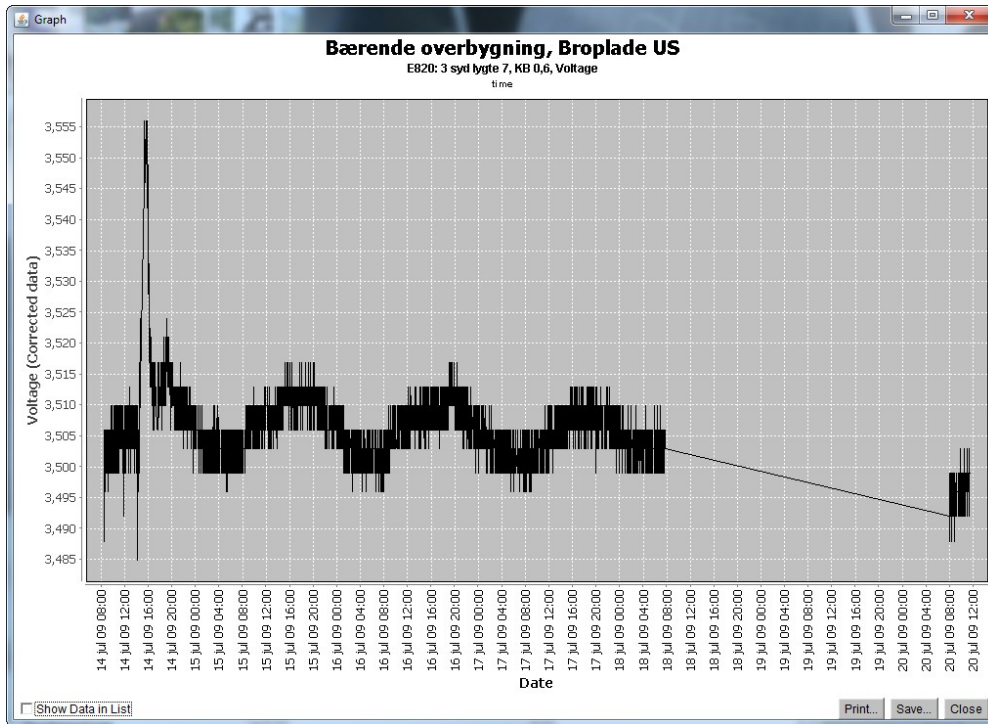


Foto 45: Skovdiget, østbro

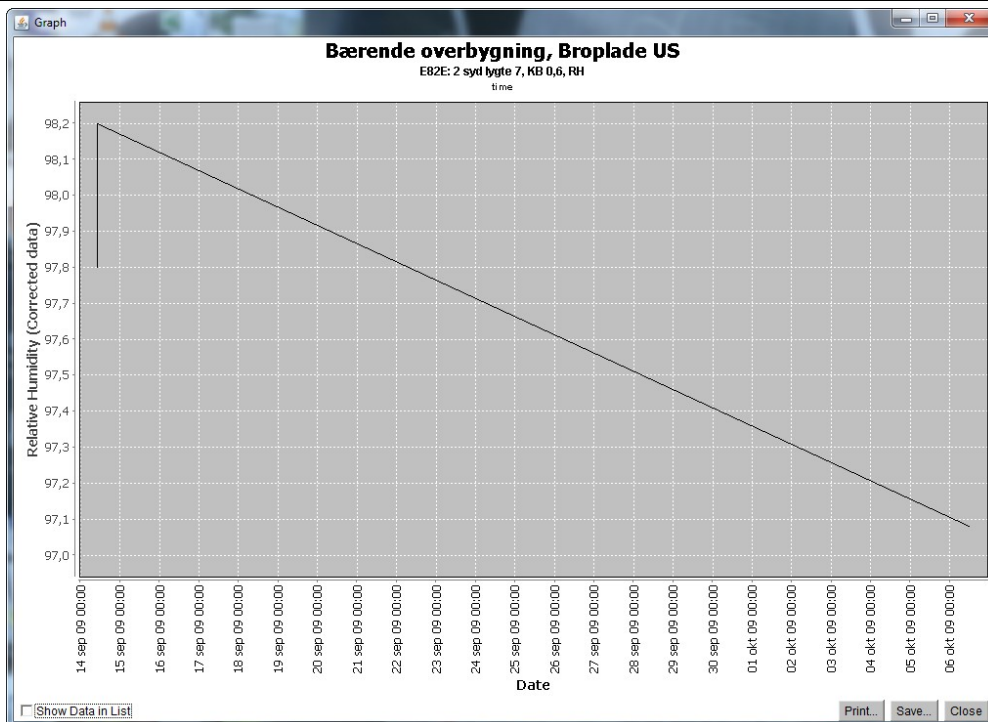


Foto 46: Skovdiget, østbro

[Vejdirektoratets broer]		Side: 24 af 27
Projekt: [7721025]	Dato: [Oktober 2010]	Init: [JTC]
Emne:	[Måledata for trådløse sensorer]	
Placering:		

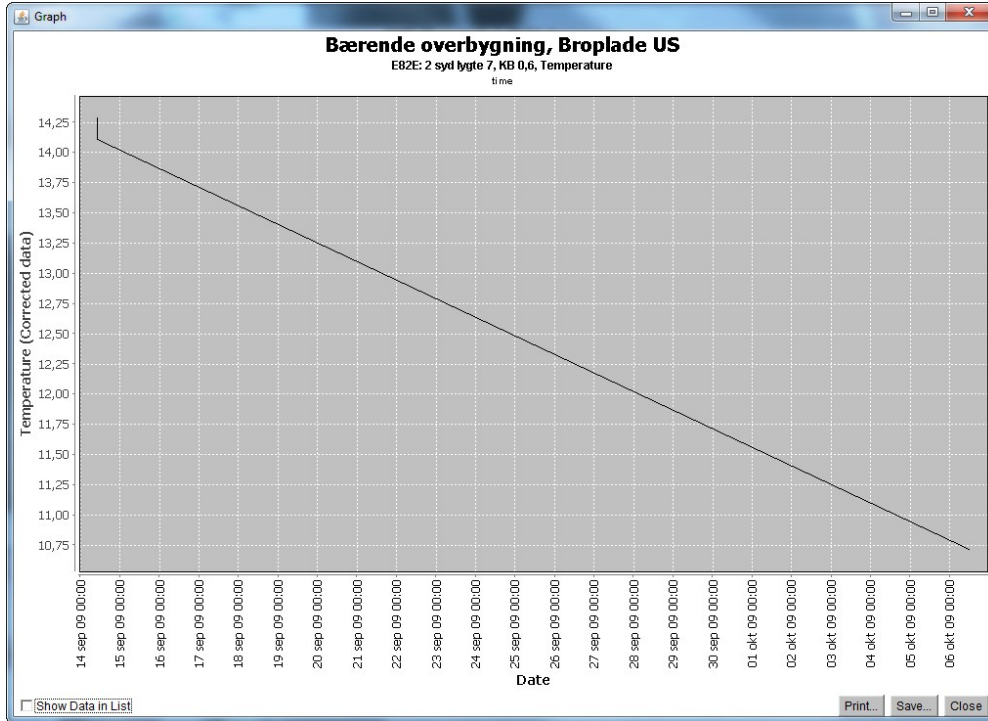


Foto 47: Skovdiget, østbro

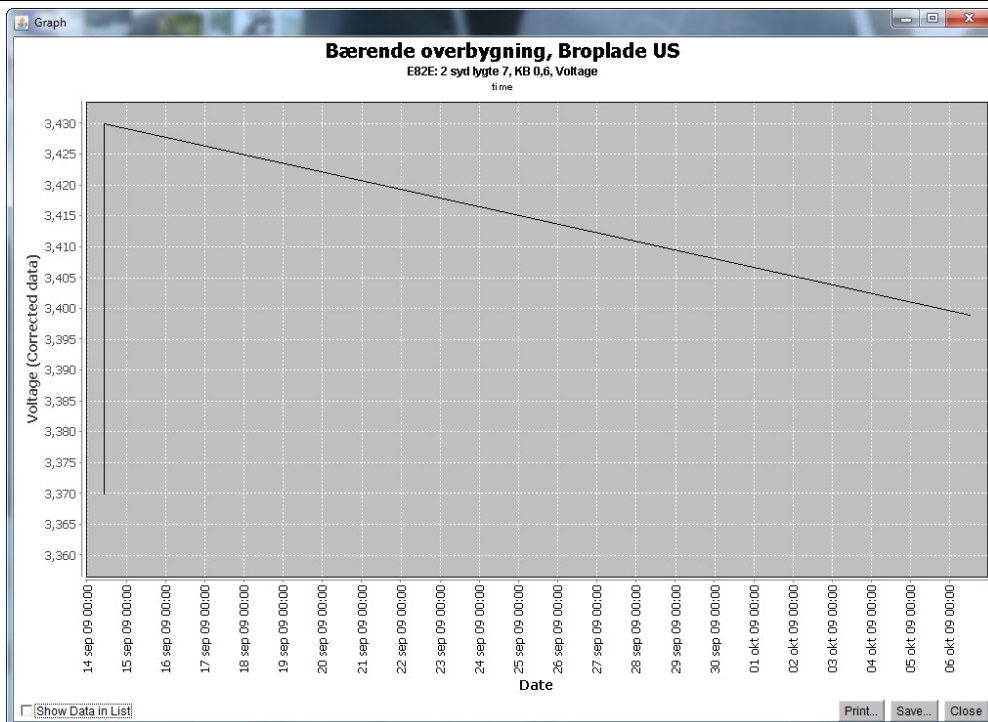


Foto 48: Skovdiget, østbro

[Vejdirektoratets broer]		Side: 25 af 27
Projekt: [7721025]	Dato: [Oktober 2010]	Init: [JTC]
Emne:	[Måledata for trådløse sensorer]	
Placering:		

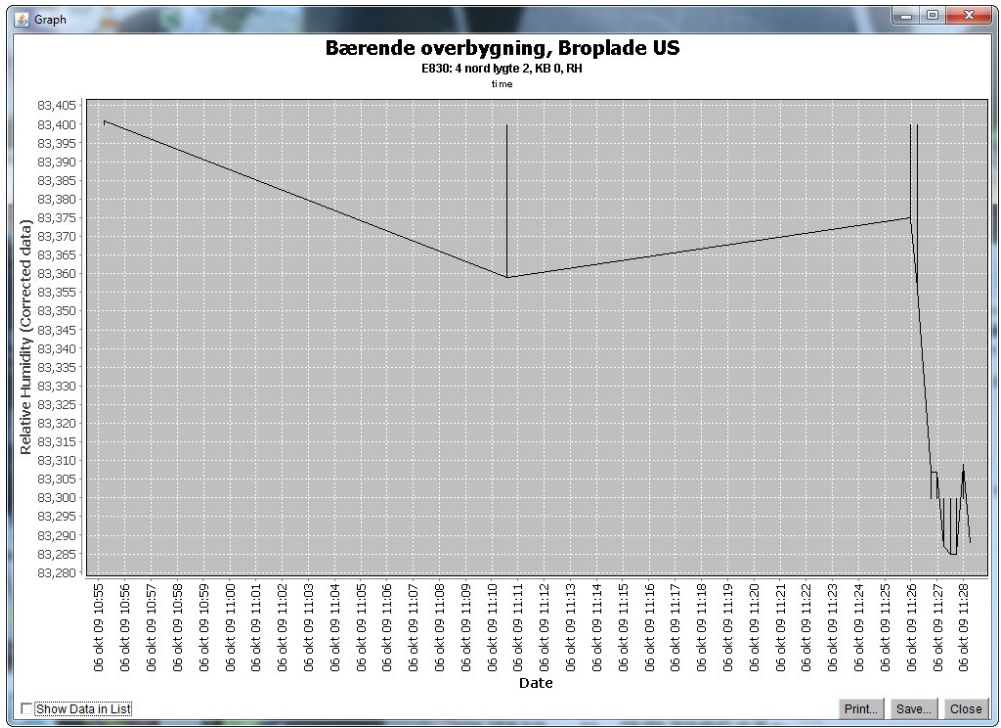


Foto 49: Skovdiget, østbro

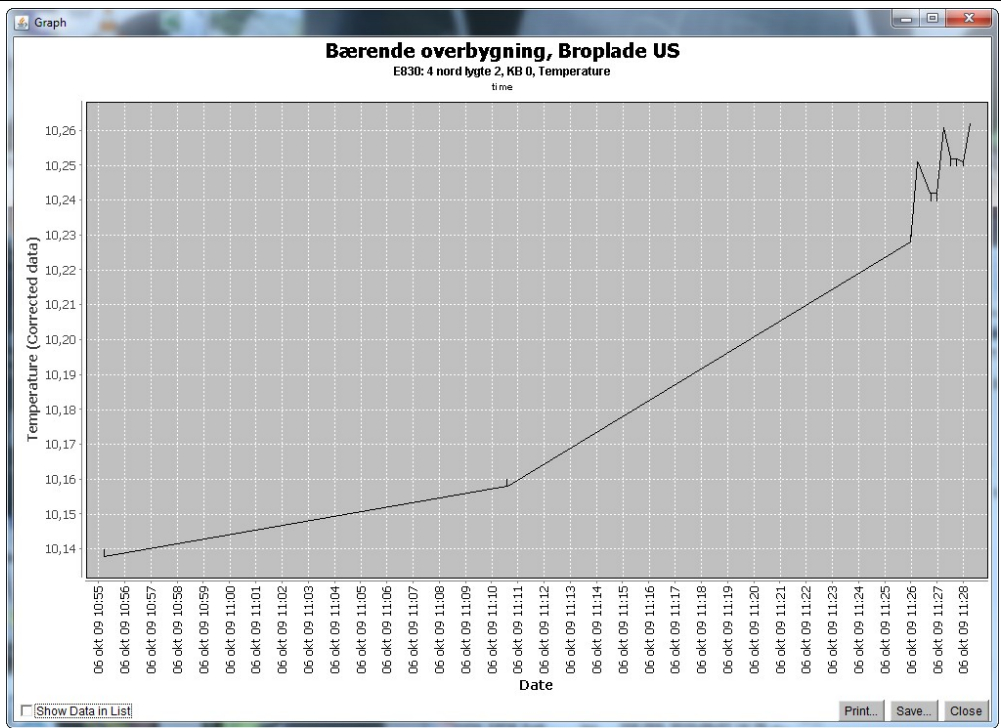


Foto 50: Skovdiget, østbro

[Vejdirektoratets broer]		Side: 26 af 27
Projekt: [7721025]	Dato: [Oktober 2010]	Init: [JTC]
Emne:	[Måledata for trådløse sensorer]	
Placering:		

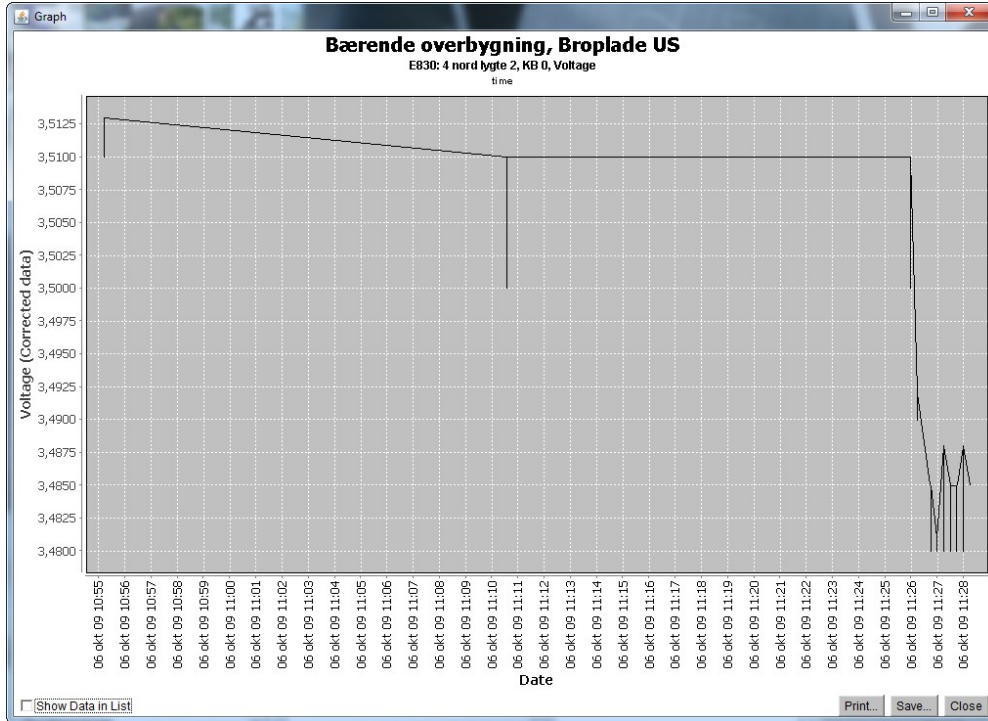


Foto 51: Skovdiget, østbro

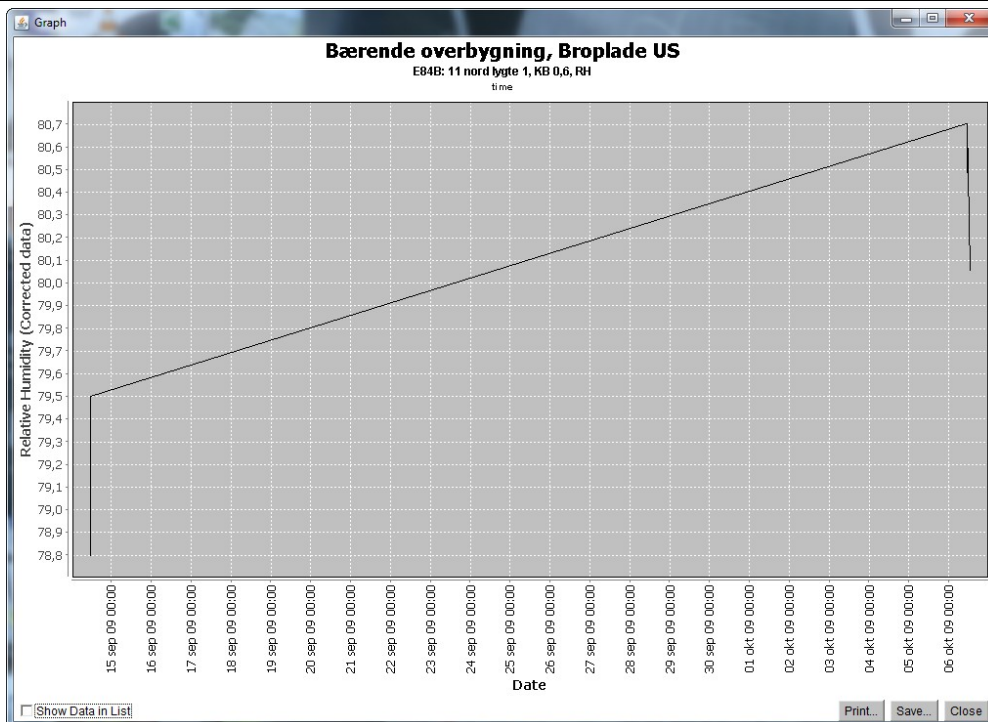


Foto 52: Skovdiget, østbro

[Vejdirektoratets broer]		Side: 27 af 27
Projekt: [7721025]	Dato: [Oktober 2010]	Init: [JTC]
Emne:	[Måledata for trådløse sensorer]	
Placering:		

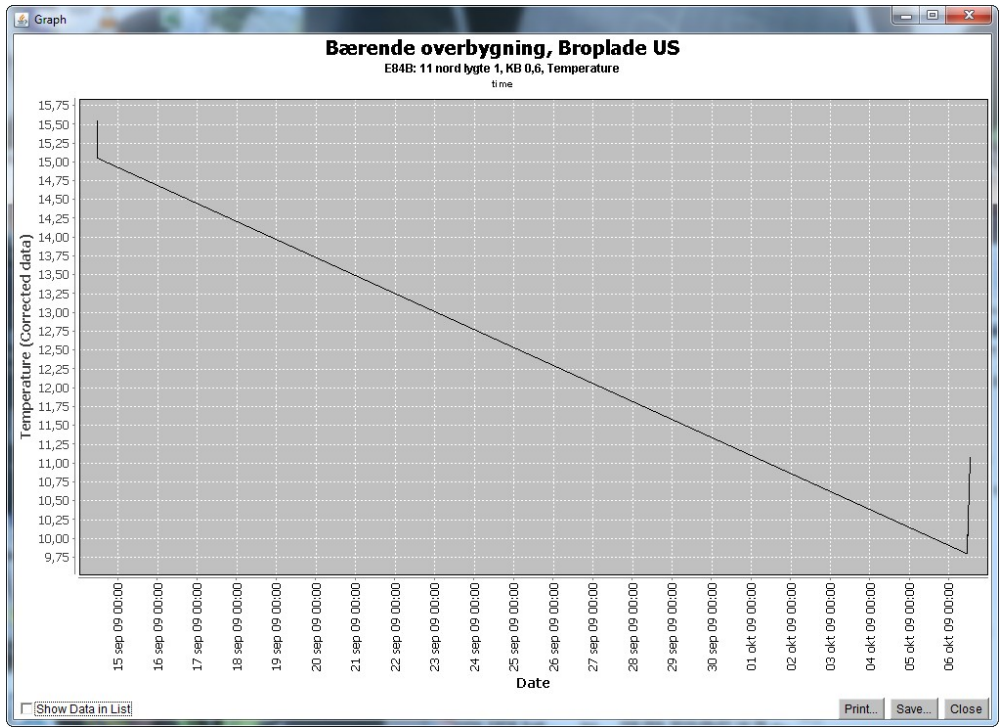


Foto 53: Skovdiget, østbro

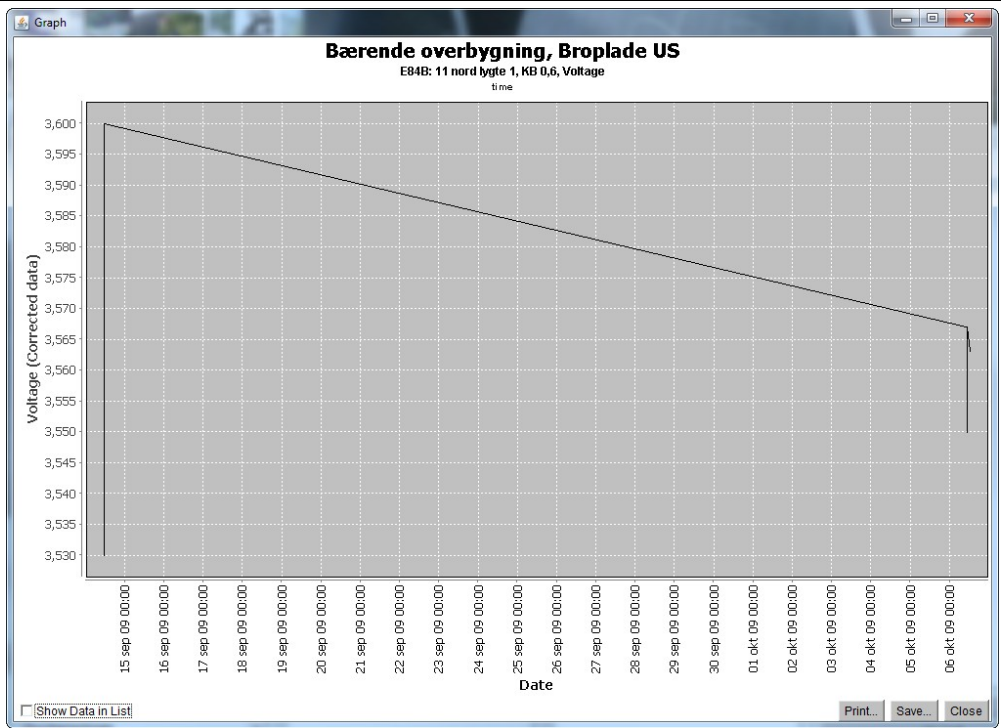


Foto 54: Skovdiget, østbro

BILAG 2

Kravspecifikationer til sensorer

Kravspecifikationer, store bygværker

Indledning

I det efterfølgende gennemgås krav og ønsker til specifikationer for trådløse sensorer til store bygværker. Kravspecifikationen er opdelt efter hvilke formål sensoren skal anvendes. Der er opstillet 2 kravspecifikationer. Den ene gælder for den semi-realistiske sensor, hvor kravene er opstillet med baggrund i hvad der forventes at være teknisk muligt indenfor en overskuelig fremtid. Den anden er for den optimale sensor, hvor der kun i begrænset omfang er skelet til hvad der kan forventes gennemført indenfor en kortere årrække. Det bemærkes, at opfyldelse af de opstillede hovedformål kræver 4 forskellige semi-realistiske sensorer, men at den optimale sensor kan opfylde alle disse behov med blot 1 sensortype.

Der er dog en række forhold, som gør det meget vanskeligt at opstille præcise krav til trådløse sensorer:

- En stor del af de forventede anvendelsesmuligheder omfatter forhold, som det med traditionelle kostbare kablede sensorer har været hensigtsmæssigt at overvåge, men det forventes, at de kommende generationer af trådløse sensorer vil muliggøre en langt hurtigere, billigere og mere detaljeret overvågning af bygværket, hvilket kan medføre at der indenfor få år kan opstå anvendelsesmuligheder, som det på nuværende tidspunkt kan være meget vanskeligt at se.
- Hidtil har trådløse sensorer kun haft lille anvendelse indenfor store bygværker, så der eksisterer kun ganske få erfaringer med disse sensorer. De opstillede krav er derfor i langt højere grad baseret på forventede anvendelser, frem for på konkrete erfaringer med anvendelsen. Nogle af de forventede anvendelser kan derfor vise sig at være urealistiske/uinteressante.
- Hidtil har tolkning af sensorsignaler (både kablede og trådløse sensorer) været en isoleret ekspertydelse uden sammenhæng med den øvrige udførelse og drift af bygværket. Med forbedrede tolkningsværktøjer, som integreres i den almindelige forvaltning af bygværket forventes anvendelsesmulighederne for trådløse sensorer også at udvides.

På baggrund af de ovennævnte usikkerhedsmomenter er det valgt at supplere de opstillede kravspecifikationer med en relativt fyldig beskrivelse af baggrunden for de opstillede krav. Tanken er så, at kravspecifikationerne kan forfines i takt med at usikkerhederne på de ovennævnte områder mindskes.

Overordnet beskrivelse af sensorspecifikationer.

Sensorer under fugtisolering

Disse sensorer tænkes hovedsageligt anvendt til at afsløre utætheder i den membran, der beskytter betonbroer mod nedsivende saltholdigt vand fra den ovenliggende kørebane. Denne registrering gør det muligt at udskifte/reparere membranen på det helt rigtige tidspunkt, dvs. så sent som muligt, men inden der opstår skader på selve broen. Hovedanvendelsen vil være på eksisterende broer, hvor det forventes at fugtisoleringen skal skiftes indenfor de næste 10-20 år, så en metode til eftermontering af sensoren er vigtig. Det må påregnes at sensoren skal fungere i min. 10-20 år (gerne 50 år). Det er muligt at føre aftastningsudstyr direkte hen over sensoren, normalt er der ikke jern over sensoren. Kravene til målenøjagtighed og tolkning er små, idet sensoren blot skal angive en helt grov ja/nej registrering af fugtmætning under fugtisoleringen.

En typisk anvendelse vil omfatte måling 1 gang hvert år over en lang årrække. Vurderingen af resultaterne skal derfor være simpel, f.eks. overførelse til broens normale forvaltningssystem, hvor de vurderes på lige fod med de øvrige inspektionsresultater for bygværket.

I udførelsesfasen kan sensorerne umiddelbart anvendes til tæthedskontrol inden den videre belægning udføres, så risikoen for indbygning af fejl i fugtisoleringen mindskes. Med en videreudvikling kan sensorerne sandsynligvis også anvendes til at vurdere hvornår underlaget er egnet til udlægning af fugtisoleringen samt til at måle, om udførelsen (påbrændingen) udføres korrekt. Den væsentligste information i udførelsesfasen vil være indenfor det første år, men med en levetid på op mod 5 år kan sensorerne afsløre fejl i hele den traditionelle garantiperiode for entreprenørarbejdet. Den mest hensigtsmæssige opbygning for sensorer til udførelsesfasen forventes at være batteridrevne aktive sensorer, der sender til en central opsamlingsenhed.

Sensorer til indstøbning

Disse sensorer tænkes hovedsagelig anvendt til at måle kloridindtrængning i ubeskyttede betonoverflader i aggressivt miljø. Målingerne muliggør en bedre varsling af skadelig korrosion, hvilket både mindsker risikoen for uvarslede svækkelser og også forbedrer mulighederne for at iværksætte forebyggende foranstaltninger inden væsentlig skade er sket. Specielt for vanskeligt tilgængelige overflader som ydervægge af tunneler vil sensorerne have store fordele. Optimalt har sensorer i nye konstruktioner en levetid på 50-100 år, men under særlige forhold, samt ved anvendelse i eksisterende konstruktioner kan en levetid på 15-25 år være acceptabel. Sensorer skal typisk aflæses gennem ca. 1 m armeret beton eller evt. gennem flere meter vand/jord. Optimal tolkning af signaler vil kræve relativt præcise målinger af min. fugt og temp. samt udvikling af nye tolkningsmetoder.

I udførelsesfasen kan sensorerne anvendes til at vurdere om betonen udvikler de forventede egenskaber (styrke og holdbarhed), og derved mindske risikoen for skjulte skader, og øger mulighederne for at korrigere fejl uden meget store omkostninger. Resultaterne kan også anvendes til mere præcis angivelse af tidspunkt for efterbehandling m.m., så unødige ventetider undgås. Eventuelt kan sensorerne udvikles til at måle betonfremstillingen (blanding, transport m.m.), så grove betonfejl afsløres inden betonen anbringes i formen. Den manglende kabling gør trådløse sensorer meget velegnede til måling under blanding, transport og udstøbning. Levetidsbehovet er ca. ½ år, og kravene til robusthed er meget store. Sensorer skal typisk aflæses gennem 1-2 m

armeret beton og evt. også i åbne blandebeholdere i metal. Optimal tolkning af resultaterne vil kræve relativt præcise målinger af fugt, temp. og evt. acceleration, og en effektiv tolkning må påregnes at kræve en relativt omfattende udvikling af tolkningsværktøjer.

Overordnet betydning af pris

To forhold betyder at prisen for trådløse sensorer skal være relativt lav:

- Næsten alle målinger kan gennemføres med traditionelle kablede sensorer i en moderat prisklasse. Eventuelt kan disse kablede sensorer være forbundet med en transmitterboks for videre dataoverførsel
- På langt hovedparten af konstruktionerne er skadesfrekvensen og betydningen af skaderne, i det område der dækkes af sensoren, så lille, at fordelene ved sensormålinger er relativt små.

Det er derfor sandsynligt, at hvis der skal ske en væsentlig udbredelse af den trådløse teknologi, er det afgørende, at udgiften for hvert målepunkt reduceres væsentligt i forhold de traditionelle kablede sensorer. Omvendt må det forventes at hvis trådløse sensorer kan reducere udgiften til sensorovervågning væsentligt, så vil mange områder på store konstruktioner med fordel kunne overvåges med trådløse sensorer.

Kravspecifikation, den semi-realistiske sensor

Egenskab	Under fugtisolering		Indstøbt	
	Udførelse	Drift	Udførelse (produktion)	Drift
Hvilke dele af konstruktionen	Bro- og P-dæk, tunneler		Udsatte og vanskeligt tilgængelige betonoverflader: uisolerede brodæk, søjler, tunneler + statisk vigtige områder (produktion og udførelse)	
Levetid	2 uger (optimalt 5 år)	50 år, evt. 10-20 år ved eftermontering	4 uger (optimalt 5 år)	100 år, evt. 25-50 år ved eftermontering
Hvor placeres sensorer	På betonoverflade direkte under fugtisolering		I dæklag over armering, for udførelse evt. også dybt inde i konstruktionen	
Metal i konstruktionen	Armeringsnet under sensoren, men kun sjældent over sensoren		Sjældent over sensoren, men aftastning kan kræve måling gennem 1 m armeret beton.	
Sensor egen id	Helst, men ikke ubetinget nødvendigt		Nødvendigt	
Sensor størrelse	Ca. 5x5cm, tykkelse <3 mm evt. 2 cm		1x3x5 cm indstøbt. Eftermonteret, Ø 10mm (evt. Ø30 mm)	
Robusthed	Temp. 160 °C + last fra asfaltmateriel		Vibration og påvirkning ved støbning Produktion: I blandemaskine	
Alkalibestandighed	Høj bestandighed		Ekstrem høj bestandighed, pH = 13	
Antal	5-10 for små konstruktioner. Mange flere ved store konstruktioner		5-10 for små konstruktioner. Mange flere ved store konstruktioner	
Eftermontering	-	Meget stor betydning	-	Væsentlig, betydning
Ekstern strøm	Giver fordele (simpel dataopsamling), men er næppe et krav		Store fordele (simpel dataopsamling og bedre målinger), men muligvis ikke et krav	
Rækkevidde	Min 30 cm, optimalt 50-100 m		Min. 20 cm, bedre 1m, optimalt 100m	
Tid for ligevægt	10 min	1 uge	10 min	1 uge
Tid for aflæsning	1 min	Max. 5 min, optimalt 40 ms	Max 5 min.	Max 1 min.
Måleusikkerhed	Fugtmætning ja/nej		Præcis måling max. $\pm 0,5\%$	
Betydning af pris	Pris er væsentlig, alternativ kablede sensorer Optimalt: sensor < 100 kr./stk. Eftermonteret: Sensor <1000 kr./stk.		Pris er væsentlig, alternativ: kablede sensorer Optimalt: sensor < 200 kr./stk. Eftermonteret: sensor < 500 kr./stk.	
Behov for tolkningsværktøj	Meget lille behov for nyudvikling		Kræver væsentlig nyudvikling	Kræver nogen nyudvikling
Bruger af software	Entreprenøregnet	Ikke-eksperter	Entreprenøregnet	Ikke-eksperter

Kravspecifikation, den optimale sensor

Egenskab	Under fugtisolering		Indstøbt	
	Udførelse	Drift	Udførelse (produktion)	Drift
Hvilke dele af konstruktionen	Hele konstruktionen, men især: - Overflader mod aggressivt miljø (søjler, bro- og P-dæk m.m.) - Styrkemæssigt hårdt belastede områder (vederlag, søjler m.m.) - Områder beskyttet af membraner m.m. (bro- og P-dæk m.m.)			
Levetid	Længere end konstruktionens levetid (min.150 år)			
Hvor placeres sensorer	Hovedanvendelser: - På betonoverflade direkte under fugtisolering - I dæklag over armering (med præcis valgt afstand til betonoverfladen) - I betonavolumen dybt inde i konstruktionen			
Metal i konstruktionen	Armeringsnet både under og over sensoren.			
Sensor egen id	Nødvendigt			
Sensor placering	Sensoren kan selv angive sin placering indenfor få cm, i dæklag skal afstanden til overfladen dog angives indenfor 1 mm.			
Sensor størrelse	Så lille som mulig. I dæklag og under fugtisolering max tykkelse 1 mm. I øvrige anvendelser kugle mindre end ca. 1cm			
Robusthed	- Forhold i blandemaskine - Vibration og påvirkning ved støbning - Temp. 160 °C + last fra asfalmateriel (anvendelse under fugtisolering)			
Alkalibestandighed	Ekstrem høj bestandighed, pH = 13			
Antal	50-100 stk. i små konstruktioner. Mange flere ved store konstruktioner			
Eftermontering	Væsentlig betydning			
Ekstern strøm	Nej, sensoren skal være selvforsynende			
Rækkevidde	Direkte dataoverførsel til mobilnet			
Tid for ligevægt	Ca. 10 min. Dog meget kortere ved eventuel måling af acceleration			
Yderligere måleparametre	Måling af acceleration, samt evt. måling af kloridindhold og korrosionshastighed.			
Måleusikkerhed	Fugt $\pm 0,5\%$ RH, temperatur $\pm 0,1$ °C			
Betydning af pris	Pris (dvs. omkostninger til: sensor, montering, dataindsamling og -tolkning) er altafgørende for anvendelsen. Sensorpris < 10 kr., anbringelse ved at kaste sensoren i betonen eller under fugtisoleringen. Automatiseret dataindsamling, og automatiseret grovtolkning af data, inkl. afsendelse af alarmmeldinger. Hovedparten af datatolkning sker ved aflæsning af alarmmeldinger			
Behov for dataopsamlingsværktøj	Etablering af automatiseret dataopsamling afgørende for anvendelse af et stort antal sensorer. Data skal overføres direkte til programmer, der anvendes ved den almindelige forvaltning af drift og vedligehold af konstruktionen.			
Behov for tolkningsværktøj	Behov for nyudvikling af tolkningsalgoritmer Behov for udvikling af automatiseret tolkning, inkl. alarmmelding			
Bruger af software	Software skal kunne benyttes af konstruktionens almindelige driftspersonale			

Beskrivelse af baggrunden for detailkrav

Måleperiode/sensorlevetid

Sensorerne har 2 hovedfunktioner:

- 1 Måling i udførelsesfasen
- 2 Måling i driftsfasen

Formålet med måling i udførelsesfasen vil typisk være at kontrollere om den nyudstøbte beton udvikler egenskaber (styrke tæthed m.m.) som forventet. Udførelsesfasen vil typisk vare frem til afleveringen og senest frem til afslutning af den udførendes 5 årige garantiperiode, altså maksimalt ca. 5 år, men den største betydning vil normalt være indenfor det første år efter monteringen.

En helt særlig anvendelse vil dog være under selve betonproduktionen: tilsætning af delmaterialer, blanding, transport, udstøbning og vibrering. Denne periode varer er kun ca. 4 timer. Sandsynligvis er det en on-line registrering af de første 1-3 timer frem til lige før betonen anbringes i formen, der rummer det største potentiale, idet grove fejl ved en betonleverance kan rettes uden større problemer for udførelsen. I denne første fase kan det blot undlades at anbringe den fejlbehæftede beton i formen. Trådløse sensorer vil medføre en unik mulighed for en sådan overvågning af betonfremstillingen.

Formålet med måling i driftsfasen er typisk at kontrollere om der opstår forhold (typisk indtrængning af vand og/eller klorider) som kan medføre væsentlig nedbrydning af konstruktionen. Driftsfasen vil typisk være op mod 50-100 år, men ved indbygning i eksisterende konstruktioner eller ved indbygning i forbindelse med reparationer kan måleperioder på ned til 5-10 år være relevante.

Placering

Det er formålet at sensorerne både kan anvendes på nye og på eksisterende konstruktioner. For begge disse konstruktionstyper er der 3 hovedanvendelser:

- A Sensoren er placeret umiddelbart under fugtisolering, og det kontrolleres om der er frit vand under fugtisoleringen.
- B Placeres på præcist udvalgte dele af konstruktionen, typisk i armeringens dæklag ud mod en overflade der er udsat for aggressiv miljøpåvirkning. Sensoren overvåger udviklingen af betonens egenskaber, primært temperatur og fugtindhold.
- C Sensoren lægges ned i betonblanderen og følger uden styring med betonblandingen

For mange af kravene til sensorerne har det kun lille betydning, om de skal anvendes på nye eller eksisterende konstruktioner, men for en del af kravene er det af stor betydning, om sensorerne skal anvendes under fugtisolering eller indstøbes i beton. I det efterfølgende er kravene til sensorerne opdelt efter hvilke anvendelser de refererer til.

Sensorplacering under fugtisolering



Foto 1, normalt område, betonoverfladen er tør og fugtisoleringen har fuld vedhæftning



Foto 2, meget skadet område: frit vand under fugtisoleringen, og fugtisoleringen hæfter ikke

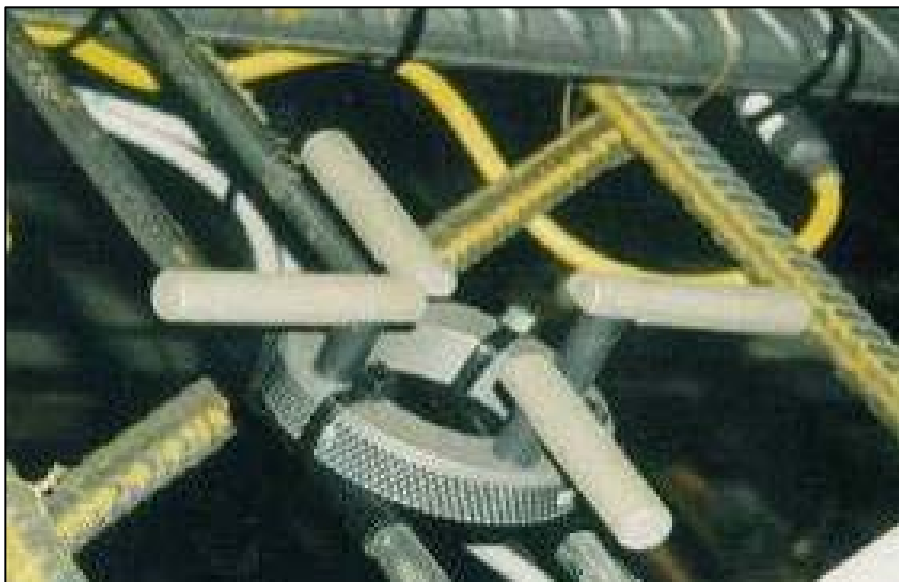
I udførelsesfasen kan sensoren anvendes f.eks. i forbindelse med fugtprøvning af membranen til at afsløre utætheder og andre fejl inden fugtisoleringen skjules af ovenliggende belægninger, konstruktioner m.m. Derved lettes udbedring, og risikoen for skjulte skader mindskes.

Ved at placere sensoren i den nystøbte beton kan der opnås et billede af udtørings/hærdeforløbet, som kan anvendes til en mere præcis angivelse af det tidligste tidspunkt for udlægning af den epoxygrunder som normalt udlægges før det egentlige fugtisoleringsarbejde påbegyndes.

I driftsfasen kan sensoren anvendes til at angive det optimale tidspunkt for udskiftning af fugtisolering, dvs så sent som muligt men inden dyre følgeskader opstår. Derved mindskes risikoen for skjulte skader samtidig med at unødvendig udskiftning af fugtisoleringer undgås.

Sensorplacering, ved indstøbning

Formålet med indstøbte sensorer er typisk at måle hvor hurtigt aggressive stoffer (fugt og klorid) trænger gennem betonens dæklag ind til armeringen, Så for sensorer til indstøbning er vigtigt kende sensorens præcise afstand til den alvorligt eksponerede betonoverflade. Typisk placeres sensoren derfor i en nøje fastlagt position i formen, hvorefter betonen udstøbes. Afstanden til den eksponerede overflade er typisk mellem 10 og 75 mm.



Eksempel på kablede sensorer placeret i forskellig afstand fra betonoverfladen (CorroEye fra Force)

Hvis sensorerne skal anvendes til kontrol af selve betonproduktionen vil sensoren typisk placeres i betonblanderen og så frit følge betonens bevægelser frem til den endelige anbringelse i formen. Placeringen i formen vil derfor være tilfældig.

På hvilke dele af konstruktionen skal sensoren benyttes?

Anvendt under fugtisolering:

Sensorerne skal primært placeres i brodæk, i P-dæk, og evt. i fugekonstruktioner, som er beskyttet af en fugtisolering.

Anvendt til indstøbning i driftsfasen:

Sensoren skal monteres i alle de elementdele som udsættes for direkte vand- og/eller saltpåvirkning. Blandt disse elementer kan især nævnes:

- Brodæk

- Brosøjler og vederlagsvægge
- Kantbjælker
- Tunnelvægge, især tunneler omgivet af saltholdigt vand

Anvendt i udførelsesfasen

I forbindelse med udførelsesfasen kan en kontrol af statisk særlig vigtige områder også være interessant. Sådanne områder vil typisk være:

- Søjler
- Vederlag
- Trykzoneområder for bøjningspåvirkede elementer

Hvor skal sensoren fysisk placeres for at gøre bedst nytte?

Sensorerne skal primært placeres i de kritiske steder på konstruktionen samt på steder, hvor risikoen for skader traditionelt er høj, f.eks. ved fuger, men det er ønskeligt også at kunne placere sensorer mere jævnt fordelt over konstruktionen, så der er stor sikkerhed for at alle større utætheder opdages.

Ved anvendelse under fugtisoleringer skal sensorerne placeres umiddelbart under fugtisoleringen for at få den tidligste varsling af skadelige forhold. De forhold som sensoren skal afsløre er vist på foto 1 og 2.

Ved indstøbning er den primære anvendelse i dæklaget over armeringen, altså 0-75 mm under betonoverfladen. Den vigtigste anvendelse vil typisk være under utilgængelige dele af betonoverfladen.

Ved anvendelse i udførelsesfasen til kontrol af betonproduktionen er sensorens præcise placering af mindre betydning, og en placering dybt inde i betonen kan også være relevant.

Både anvendt under fugtisolering og ved indstøbning må det dog påregnes, at sensorerne kun kan registrere skader, som opstår indenfor en relativt kort afstand fra sensoren (max. 30-50 cm), så sensoren skal placeres relativt tæt på det område som skal kontrolleres.

Er der metal i konstruktionen (armering)?

Der er næsten altid relativt tætliggende armering 30-50 mm under sensoren.

Anvendt under fugtisoleringen er der typisk ikke armering over sensoren. I nogle gamle belægninger er der armering i betonlaget over sensoren, og denne armering vil normalt være med en maskevidde på mellem 10x10 cm og 15x15 cm. En typisk opbygning for en sådan gammel belægning er vist på foto nr. 3.



Foto 3, gammel beskyttelse af fugtisolering: 2 lag asfalt og 1 lag armeret beskyttelsesbeton.

Ved anvendelse til indstøbning er sensoren normalt placeret i dæklaget uden på armeringen så der er normalt ikke armering over sensoren, men det dæklag som sensoren er anbragt i vender ofte ud mod en vanskelig tilgængelig overflade (dækket af vand eller jord). Derfor skal indhentning af signaler ofte ske fra ”indersiden” af konstruktionen, og signalerne skal derfor vandre gennem hele armeringsopbygningen.

Ved anvendelse til kontrol af udførelsen er sensoren normalt placeret tilfældigt inde i konstruktionen, og vil derfor normalt være omgivet af et armeringsnet med en maskevidde på mellem 10 og 15 cm.

Skal hver enkelt sensor have eget ID og derved kunne identificeres individuelt?

Anvendt under fugtisolering er en individuel identificering ikke ubetinget nødvendig, men det er nødvendigt at kunne lokalisere sensorens placering indenfor ca. 0,5 m. Hvis aftastning af sensorerne sker fra kørende fartøjer vil det dog sandsynligvis være så vanskeligt at fastlægge sensorernes position, at en individuel registrering vil være nødvendig.

Ved anvendelse til indstøbning vil sensorens placering ikke kendes eller sensorer er placeret så tæt at sensorernes individuelle placering ikke kan fastlægges ved ydre måling, og en individuel registrering af sensorerne er dermed nødvendig.

Hvor stor må sensoren være?

Under fugtisolering

Anvendt under fugtisolering må sensoren helst ikke være mere end 1, max 2 mm tyk. Hvis tykkelsen bliver større vil det lokalt være nødvendigt at afslibe betonen på området, hvor sensoren skal placeres. Dette vil fordyre udlægningen og vil øge risikoen for at sensoranbringelsen svækker holdbarheden for fugtisoleringen, og derved påvirke målingerne. Længde og bredde for sensoren er ikke helt så vigtige, men helst ikke meget større end 50 x 50 mm.

Indstøbt i driftsfasen

Anvendt til indstøbning Ved anvendelse til indstøbningen skal sensoren typisk fastbindes på armeringen, eller en anden form for stativ, og sensoren skal derfor have en størrelse der muliggør en sikker fastgørelse uden at være så stor, at udstøbningen af den omgivende beton påvirkes nævneværdigt. Anslået vil dimensioner på op til 1 x 2 x 5 cm være acceptable, men der skal være et klart defineret måleområde. I forbindelse med eftermontering vil det dog være vigtigt at kunne placere sensoren i et boret hul, hvilket sætter en øvre grænse for diameteren på 30 mm, men for at kunne anbringe sensoren, så den måler i en nogenlunde uforstyrret beton, må diameteren næppe være større end 10 mm. Sensorens længde må næppe være større end 1cm.

Kontrol i produktionsfasen

Til kontrol i produktionsfasen skal sensoren i princippet være så lille som muligt og ikke meget større end de største tilslagsmaterialer, typisk 24-36 mm sten.

Hvor mange sensorer er nødvendige for at opnå den ønskede information i det givne bygværk?

Under fugtisolering og til indstøbning ved overvågning af driftsfasen

For små broer (længde 20-40 m) må det påregnes at min. 5-10 sensorer vil være nødvendige, men for lidt større konstruktioner kan et langt højere antal blive nødvendigt for at opnå en rimelig overvågning af tilstanden.

Kontrol i produktionsfasen

Optimalt skal alle betonblandinger kontrolleres, dvs. 1 sensor for hver 5-10 m³ beton, hvilket dog let bliver 50-100 sensorer for blot moderate bygværker og over 1000 sensorer til de helt store broer m.m. Ved at koncentrere kontrollen omkring de mest kritiske dele af betonen kan sensorantallet dog reduceres noget.

Funktionsfase: produktion, udførelsen eller i driftsfasen?

Under fugtisolering

For at udnytte sensorerne optimalt, skal de anvendes i alle 3 faser:

- I produktionsfasen kontrolleres: Er underlaget egnet til at udlægge fugtisoleringen på?

- I udførelsesfasen kontrolleres f.eks. diffusionstæthed for grundingen og brændetemperatur for tagpappen og herudover kan sensorerne anvendes til en tæthedsprøvning inden de efterfølgende belægningsarbejder fortsættes.
- I driftsfasen anvendes sensoren til at måle om der trænger skadelige stoffer ned gennem fugtisoleringen.

Den mest hensigtsmæssige placering for sensorerne er i alle 3 perioder den samme, og de forventelige måleparametre er nogenlunde ens, så principielt bør det være muligt at anvende de samme sensorer i alle 3 faser.

Til indstøbning

De forventelige potentielle anvendelser for sensorerne er koncentreret omkring selve betonmaterialet og disse anvendelser er:

- I den tidlige produktionsfase (før anbringelse i form), kontrol af:
 - Tilslagsmaterialer (fugt, temp.)
 - Blandindstid og –intensitet, viskositet
 - Transporttid og blanding under transport samt udvikling i viskositet
- Produktionsfasen, efter anbringelse i form: Vibreringstid og –intensitet og andre støbeforhold
- Hærdefasen, (se fig. 1) måling af om betonen udvikler de korrekte egenskaber (styrke og tæthed) samt betonens egnethed til videre behandling (overfladebehandling, fugtisolering m.m.)
- Måling af om der opstår forhold der accelererer nedbrydningen i driftsfasen: fugt- og kloridindtrængning

Sensoren til måling i produktionsfasen skal anbringes frit svævende i betonen og skal foruden måling af temperatur også gerne kunne måle accelerationer. Sensoren til måling i hærde- og driftsfasen skal normalt være placeret meget præcist, og vil derfor typisk være fastgjort til armeringen inden støbningen. Det vil næppe være muligt at anvende samme sensorer til at måle i alle faser af bygværkets levetid, men målinger i hærde- og driftsfase vil sandsynligvis kunne udføres af samme sensorer.

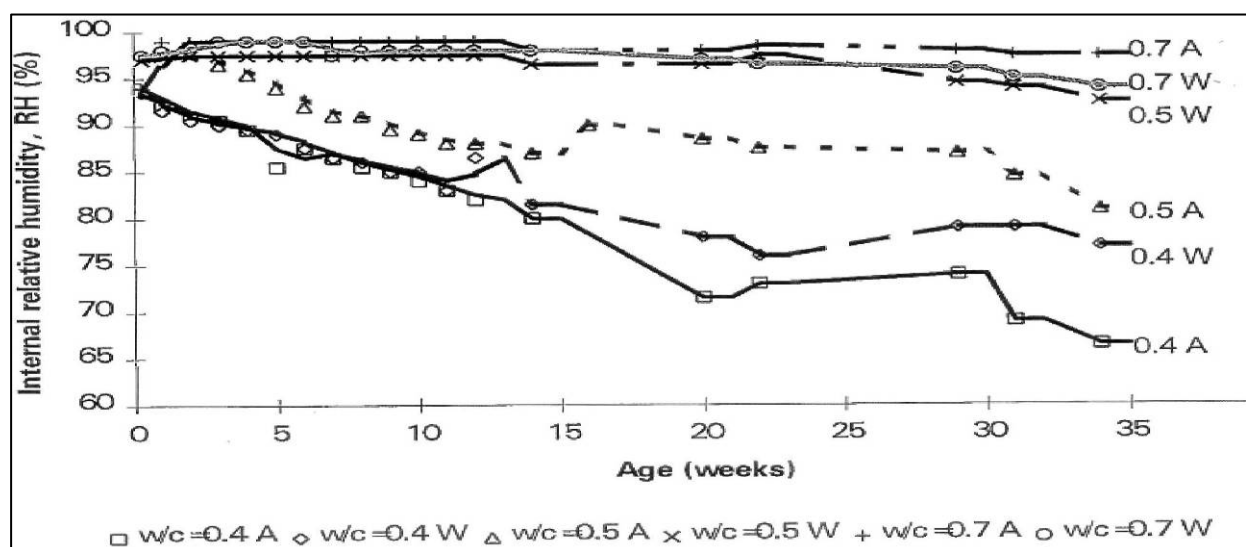


Fig.1, Betonens V/C-tal, og dermed betonegenskaberne, påvirker fugtudviklingen i høj grad.

Hvad er den nødvendige levetid for sensoren?

For anvendelse i produktionsfasen vil levetider på blot få uger være acceptable.

For anvendelse i udførelsesfasen vil levetider på 1-2 år, optimalt 5 år være nødvendige.

For anvendelse i driftsfasen vil det være optimalt at sensoren har samme levetid, som den konstruktion den indbygges i, dvs. ca. 100 år. Ved nogle anvendelser i driftsfasen kan kortere levetider eventuelt accepteres. Under nye fugtisoleringer er det nødvendigt, at sensoren har en sikker levetid på min. 50 år, svarende til den forventede levetid for fugtisoleringen. Ved anvendelse under eksisterende fugtisoleringer eller ved partielle udskiftninger er kravet til levetid ca. 20-30 år, eventuelt ned til 10 år. Ved indstøbning i eksisterende konstruktioner vil levetider på min. 25 år normalt være nødvendige.

Generelt er det dog vigtigt, at skader på sensorer tydelig kan opdages.

Er det nødvendigt at sørge for ekstern strømtilførsel?

Ekstern strømtilførsel er ikke noget absolut krav, idet simple målinger af fugt og temperatur bør kunne gennemføres af passive sensorer, og for en del anvendelser er det muligt at føre aflæsningsudstyr tæt hen over sensoren. Specielt under fugtisoleringer er disse forhold mulige.

Men for indstøbning i betonen i driftsfasen og specielt i udførelsesfasen øges sensorernes udsagnskraft meget hvis målingerne er mere præcise, hvilket forventes at kræve en ekstern strømtilførsel. Foruden at muliggøre langt mere pålidelige og præcise målinger vil en ekstern strømtilførsel desuden muliggøre andre målinger som f.eks. ledningsevne, hvilket vil udvide sensorens anvendelighed. Eventuelt kan en kortvarig strømtilførsel i forbindelse med den trådløse aftastningsproces give en værdifuld udvidelse af sensorens anvendelighed.

En ekstern strømtilførsel muliggør dog en automatisk og mere central opsamling af data hvilket kan nedbringe omkostningerne til drift af sensormålingerne.

Skal sensoren være langtidsstabil i alkalisk miljø?

Ved anvendelse umiddelbart under membranen må det påregnes at miljøet er noget alkalisk, men dog ikke ekstremt alkalisk. Ved indstøbning i beton, er det klart nødvendigt, at sensoren er holdbar i højalkalisk miljø (pH 12-13) der findes i betonen.

Skal sensoren kunne tåle at blive udstøbt og vibreret?

Ved anvendelse under fugtisolering er det ikke nødvendigt, men det er til gengæld nødvendigt, at sensoren kan tåle, eller har en vis beskyttelse mod, den ca. 200 grader varme klæbemasse, som fugtisoleringsen fastklæbes med. Herudover skal sensoren kunne modstå påvirkningerne fra udlægning og tromling af asfalten oven på fugtisoleringsen. I driftssituationen skal sensoren kunne tåle direkte trykpåvirkning fra hjultryk.

Ved indstøbning i betonen, vil det være mest hensigtsmæssigt at sensoren kan tåle at blive udstøbt og vibreret. Ofte vil det være muligt at anbringe sensoren efter udstøbning, men det vil

ofte være vanskeligere og ofte kunne medføre målefejl som følge af at anbringelsen ændre egenskaberne for det dæklag som sensoren skal kontrollere.

Skal sensoren kunne tåle at være i en beton-blandemaskine?

Ved langt de fleste anvendelser vil det ikke være nødvendigt at sensoren kan tåle påvirkningerne i en blandemaskine, idet sensorerne normalt ønskes placeret præcist og som minimum skal placeringen kendes præcist. Men hvis der udvikles metoder til en præcis lokalisering af sensorerne i betonen kan det eventuelt være relevant allerede at anbringe sensorerne under betonblandingen.

Ved kontrol af betonproduktionen vil det største udbytte opnås, hvis sensoren kan anbringes i betonblandemaskinen. Hvis sensoren først anbringes efter betonen er ude af blandemaskinen reduceres mulighederne for at kontrollere betonkvaliteten..

Skal sensoren kunne eftermonteres?

Den mest betydningsfulde anvendelse under fugtisolering er under eksisterende fugtisoleringer, så det af stor betydning at sensoren kan eftermonteres. Umiddelbart forventes dette ønske dog ikke at påvirke kravene til sensoren væsentligt. Men der skal udvikles en særlig monteringsmetode, så anbringelsen ikke forringer fugtisoleringens tæthed.

For anvendelse til indstøbning er det også væsentligt at sensoren kan eftermonteres, men den mest betydningsfulde anvendelse er dog sandsynligvis på utilgængelige hvor eftermontering ikke er mulig, så for anvendelser til indstøbning er det ønskeligt at sensorerne kan eftermonteres men ikke af afgørende betydning. Også for anvendelse til indstøbning skal der udvikles en særlig metode til montering af sensoren, så sensormonteringen ikke forstyrrer fugtindtrængningen omkring sensoren.

Hvor lang skal sensorens rækkevidde være?

Optimalt skal sensorernes rækkevidde svare til udstrækningen for konstruktionen, således at der kun behøver at være en central transmitterboks på konstruktionen. For langt hovedparten af konstruktionerne vil en rækkevidde på 50-100 m dermed være tilstrækkeligt, men på store konstruktioner kan større rækkevidde være ønskelig.

Med hensyn til minimumskrav, så vil sensorer under fugtisolering være overdækket af ca. 10 cm asfalt/beton, og for langt hovedparten af sensorerne forventes kontrolmåling at kunne ske på den vandrette overside af belægningen direkte over sensoren, så for sensorer under fugtisolering skal rækkevidden være mindst ca. 30 cm. .

Med hensyn til den lavest acceptable rækkevidde for indstøbte sensorer, så er de typisk placeret under 1-8 cm uarmeret beton, og under optimale betingelser kan kontrolmåling ske på betonens yderside, umiddelbart over sensoren. Ved særlige anvendelser på ydersiden af jord- eller vanddækkede overflader er en væsentl, vil en væsentligt dybere montering (50-100 cm) ofte være interessant. Så en absolut minimumsrækkevidde på 10-20 cm gennem uarmeret beton, men en rækkevidde på ca. 1 m gennem armeret beton vil øge anvendeligheden til indstøbning meget. For anvendelse til kontrol af betonproduktionen så kræver den optimale anvendelse at sensoren har en rækkevidde så kan aftastes når den er inde i en åbenstående betonblender/betonkanon på ca. 5-10 m³.

Hvor lang tid må ligevægtsindstilling tage?

Ved langt de fleste anvendelser er der meget små krav til målefrekvensen, sjældent vil det være nødvendigt at registrere oftere end 1 gang/time. I driftssituationen vil meget lavere målefrekvenser være tilstrækkelige, og specielt for anvendelsen under fugtisolering kan en målefrekvens på ned til 1 gang/år være acceptabel. Ved kontrol af betonproduktionen skal målefrekvensen dog være meget højere f.eks. 1 gang/minut.

Med hensyn til aflæsningen af sensorvisningen under fugtisoleringer vil det være af stor fordel, hvis sensoren kan aflæses fra et fartøj der kører med min. ca. 40 km/t, idet omkostninger til afspærring af trafikken derved kan undgås. Med en antennelængde på ca. 0,5 m fås dermed en tid til aflæsning på ca. 40 msek. Hvis det ikke er muligt at aflæse fra et kørende fartøj, er det ikke af stor betydning om aflæsningen tager et sekund eller et minut.



Foto 4, Ved stilstand på vejen skal der søges tilladelse og afspærring skal etableres.

Skal sensoren kunne kalibreres?

Under fugtisoleringer er det ikke ubetinget nødvendigt, men det er vigtigt at sensoren ikke blokerer, hvis den udsættes for kondensdannelse. Hvis der er risiko for at sensoren blokerer, skal der være mulighed for at nulstille den.

Ved indstøbning skal målenøjagtigheden være væsentlig større, og langtidsstabiliteten skal være meget stor. For denne anvendelse vil der næppe kunne opnås nogen god tolkning af tilstanden alene ud fra måleværdier i et punkt, men ved at sammenligne målingerne i 2 eller flere punkter vil der sandsynligvis kunne opnås en langt bedre tolkning af tilstanden. Det må derfor påregnes at en eller anden form for kalibreringsmulighed vil være nødvendig.

Hvad er den tilladelige måleusikkerhed?

For anvendelse under fugtisoleringer skal sensoren anvendes til en meget grov angivelse af om der opstår frit vand under fugtisoleringen (se foto 1 og 2), og til en så grov angivelse er kravene til målenøjagtighed ikke ret store, men det er vigtigt, at tilstedeværelsen af frit vand tydeligt kan måles.

For anvendelse til indstøbning er kravene til målenøjagtighed væsentligt højere, men vi har endnu ikke et fuldt overblik over hvor præcist målingerne behøver at være. Sandsynligvis vil den

relative fugtighed i helt upåvirkede områder være omkring 90% og stige til omkring 95-99% ved omfattende opfugtning. Det må desuden forventes at sammenligning mellem målinger udført i forskellig afstand under betonoverfladen vil gøre vurderingen mere præcis.

Ved at gøre sensorens måling mere specifik vil kravene til nøjagtighed sandsynligvis kunne nedsættes væsentligt samtidig med at sensorens anvendelighed kan øges. Ved at gøre sensorindkapslingen følsom for særlige stoffer som f.eks. klorid mindskes kravene til målingernes nøjagtighed væsentligt, idet det blot skal angives, om der siden den seneste måling er trængt klorid frem til sensoren. Mange målinger baseres på risikoen for korrosion, ved at indkapsle sensoren i en tynd metalfolie, som bortkorroderer/perforeres, hvis der opstår korrosive forhold ved sensoren kan der ligeledes opnås en mere simpel enten/eller måling.

Er prisen en styrende faktor eller kan indlejringen af en sensor spare så mange penge, at sensoren godt kan tåle at være lidt dyrere?

Ved den påtænkte anvendelse er det område, der overvåges af hver sensor, relativt beskedent, og en nogenlunde sikker kontrol af større skader på hele konstruktionen vil derfor kræve et relativt stort antal sensorer. Sensorens pris har derfor stor betydning. For sensorer, der ved udførelsen anbringes under fugtisoleringen, bør omkostningerne til monteringen af sensoren være ganske små f.eks. 10 kr/stk, så sensorprisen kan derfor let have stor betydning for de samlede omkostninger. For eftermonterede sensorer, må det dog påregnes at udgifterne til eftermonteringen næppe bliver lavere end 100 - 1000 kr/stk, og fordelene ved en helt billig sensor bliver dermed begrænsede.

Ved nogle anvendelser er det lettere at udpege nøglepunkter, hvor skader typisk opstår, og ved disse anvendelser kan der opnås en god overvågning selv med et relativt lille antal sensorer, og prisen får dermed ikke den helt store betydning. Generelt gælder dog, at hvis ganske få sensorer kan spare rigtigt mange penge, så vil måling med kablede sensorer sandsynligvis være mere relevant, idet de bør være mere præcise og have en bedre dokumenteret holdbarhed.

Samlet må det påregnes, at sensorernes anvendelighed vil øges meget, hvis de er billige - både at fremstille, anbringe og overvåge.

Hvem er de endelige brugere? Professionelle eller almindelige mennesker? Hvor stor grad af brugervenlighed skal sensor/tilknyttet software besidde?

Anvendelse af sensorer i forbindelse med produktion og udførelse sker over en relativt kort periode, og vurderingen af resultaterne vil typisk foretages af entreprenører, svarende til vurderingen af de nu rutinemæssigt anvendte temperaturmålinger ved betonstøbning. Vurderingen skal typisk ske i løbet af meget kort tid og foretages af ikke-eksperter, og det vil derfor være nødvendigt, at softwaren til anvendelse af målingerne har en høj brugervenlighed og er tilpasset denne specialiserede anvendelse.

Anvendelsen af sensorerne i driftssituationen kræver en jævnlig kontrolmåling (f.eks. 1 gang/år) over en længere periode, og for at nedbringe de samlede omkostninger er det derfor vigtigt, at kontrolmåling og den videre behandling af måleresultaterne er en ikke-ekspert ydelse, og at den f.eks. kan udføres af Vejdirektoratets normale inspektions/driftspersonale. Det er tanken, at

målingerne fra sensorerne let skal kunne overføres til de normale forvaltningsprogrammer for konstruktionerne - på lige fod med andre observationer på konstruktionen. Indføjet i forvaltningsprogrammet skal disse samlede informationer være basis for i den løbende beslutningsproces vedrørende drift- og vedligeholdelse af konstruktionen. Resultaterne fra sensorerne skal derfor også kunne vurderes af de personer, der forestår den sædvanlige drift af konstruktionen. Hele softwaredelen, inkl. måling og vurdering af resultater skal derfor hovedsagelig være tilpasset denne relativt snævre brugergruppe. Behandlingen af resultaterne fra sensorerne er dog en meget lille del af arbejdet for brugergruppen, så det er nødvendigt at softwaren til anvendelse af målingerne har en meget stor brugervenlighed.

Hvilke krav til udvikling af tolkningsmetoder/-værktøj kræver anvendelsen af sensorerne

Anvendelsen under fugtisoleringer forventes at levere så tydelige ja/nej målinger, at behovet for beslutningsstøtteværktøjer forventes at være meget lille

Målinger fra indstøbte sensorer kan næppe anvendes direkte, idet betonens fugtindhold ikke har nogen direkte sammenhæng med tilstanden. For at få væsentlig nytte af sensorvisningerne er der derfor behov for udvikling af metoder til tolkning af resultaterne. Det forventes at der med samtidige målinger i forskellig dybde fra betonoverfladen (fugtprofiler) vil opnås en bedre tolkning af målingerne fra driftsfasen.

For målinger i produktions- og udførelsesfasen er tolkningen også usikker, idet der ikke findes retningslinier for hvordan fugt og temperatur skal udvikles i denne periode. For denne fase vil det også være nødvendigt at udvikle metoder til at tolke målingerne. Ved f.eks. at gennemføre målingerne under prøvestøbningen kan der muligvis opnås en reference for den aktuelle beton, som de øvrige målinger skal følge.

For at få det fulde udbytte af sensorerne kan det muligvis være nødvendigt at gøre målingerne mere specifikke, så der i højere grad måles på forhold af mere direkte betydning for den tilstand der skal måles f.eks. ved at indkapsle sensoren eller ved at udføre flere målinger end temperatur og fugt. For at få et optimalt udbytte af målinger under betonproduktionen vil det sandsynligvis være nødvendigt at sensoren kan måle acceleration. Specielt for korttidsanvendelserne i produktions- og udførelsesfasen, hvor sensorerne kan have batterier som ekstern strømforsyning, bør der være muligheder for at udvide de målemetoder som sensorerne kan udføre.

BILAG 3

SMART-Monitoring brochure

SMART vedligeholdssystem til infrastrukturanlæg---

Det webbaserede vedligeholdssystem SMART understøtter en systematisk, velorganiseret og dokumenteret forvaltning. Det giver overblik på planlægningsniveau og praktiske værktøjer på udførelsesniveau. Det webbaserede koncept sikrer, at alle involverede parter har adgang til løbende opdaterede programmer og data.

Rambøll har udviklet det webbaserede vedligeholdssystem SMART som et moderne IT-værktøj, der muliggør et systematisk og veldokumenteret vedligehold af anlægskonstruktioner.

- SMART giver brugere og beslutningstagere på alle niveauer i organisationen de nødvendige værktøjer og information til en effektiv styring:
- Overblik over anlæggene og deres tekniske egenskaber
 - Overblik over tilstand
 - Overblik over vedligeholdsbehov
 - Overblik over og styring af indmeldte, igangværende og afsluttede aktiviteter
 - Overblik over kort- og langsigtede budgetbehov
 - Overblik over dokumenter
 - Let adgang til informationer

Registrering – hierarkiet af anlægs-elementer
Fortegnelsen over konstruktionerne er grundlaget i ethvert vedligeholdssystem. I SMART er konstruktionerne og deres komponenter organiseret i et fleksibelt hierarki.

Prototyper definerer, hvilke typer konstruktioner, der kan registreres i SMART, samt hvordan de kan inddeles i komponenter og underkomponenter. Prototyperne definerer endvidere, hvilke tekniske data der kan registreres under de forskellige konstruktions- og komponenttyper.

Grafisk navigation i elementstrukturen giver en intuitiv adgang til konstruktionerne, også for brugere, der ikke har et dybdegående kendskab til

anlæggene og principperne for deres registrering.

Aktivitets- og budgetstyring
SMART kan håndtere alle drifts- og vedligeholdsaktiviteter.

De kort- og langsigtede budgetkrav til udførelse af de indmeldte aktiviteter kan vises som illustrative søjlediagrammer. Diagrammerne kan vise fordelingen mellem jobtyper, jobprioritet eller jobstatus, og for det indeværende år kan de faktiske omkostninger vises i forhold til det oprindelige overslag.

I en normalsituation passerer et job igennem fem status-niveauer fra indmeldt til arkiveret – fra vugge til grav. Brugerstyringen definerer for hver bruger, hvilke statusændringer han kan foretage.

Indmelding
Behovet for udførelse af en aktivitet (eftersyn, rutinemæssigt vedligehold, reparation eller andet) registreres ved at oprette et job med status

indmeldt. Jobbet kan tilknyttes ethvert element på ethvert niveau i hierarkiet.

Prioritering / budgettering
De indmeldte job håndteres via en prioriteringsprocedure, hvor det besluttes, hvilke job der skal vælges til udførelse. Som en hjælp i beslutningsprocessen gives brugeren et løbende opdateret overblik over de budgetmæssige konsekvenser af valgene. Endvidere vises de pågældende elementers tilstandskarakter, således at man kan sikre sig, at man får håndteret de alvorligste skader.

De udvalgte job får statusen **valgt**.

De job, der ikke er valgt, kan bevare statusen indmeldt til fremtidig genovervejelse, de kan tildeles statusen **fravalgt**, eller de kan slettes helt.

Udførelse
Enhver entreprenør kan på ethvert tidspunkt åbne en checkliste, der indeholder de job, han skal udføre.

Brugerstyringen sikrer, at han kun kan se sine egne job. Han kan printe checklisten, og han kan printe de enkelte arbejdsordrer på hvert job.

Når opgaven er udført, ændrer han status til **udført** og registrerer slutpris, faktisk udførelsesdato samt eventuel dokumentation såsom fotos, mængdelister, som udført tegninger, kvalitetssikringsdokumenter m.v.

Afslutning / Godkendelse
Den tilsynsførende gennemgår de job, der er rapporterede som udførte. Han accepterer hvert job ved at ændre status til **afsluttet**, eller han returnerer det til entreprenøren ved at ændre status til **afvist** – i så fald vil jobbet komme op på entreprenørens checkliste igen med den tilsynsførendes kommentarer.

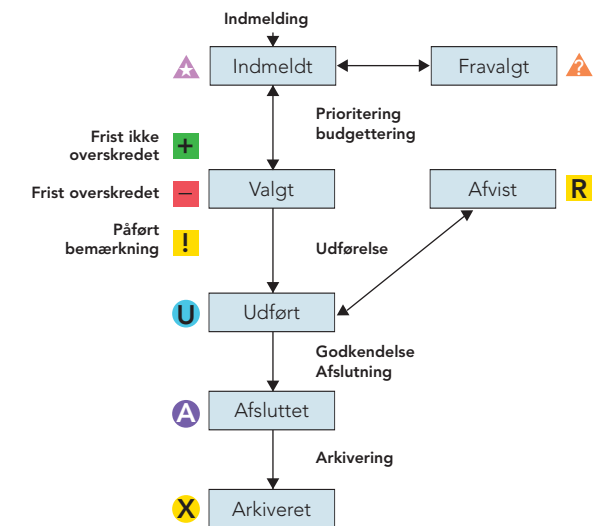
Arkivering
Når et job er afsluttet og alle registreringer er foretaget, kan jobbet arkiveres. Herefter vil det forsvinde fra den normale

joboversigt, men vil stadig være tilgængelig som arkiveret kopi.

Generaleftersyn
I generaleftersynsmodul tildeles alle de inspicerede elementer en tilstandskarakter samt en beskrivelse af skaden og fotos, der dokumenterer den, hvis det er relevant. Behov for afhjælpende aktiviteter eller yderligere undersøgelser registreres gennem genveje til aktivitetsstyringsmodul.

Generaleftersynsrapporten kombinerer tekniske data med registreringer af den faktiske tilstand, historisk udvikling af tilstandskarakterer, historik over tidligere udførte aktiviteter samt indmeldte kommende aktiviteter – illustreret med fotos.

Modul giver endvidere mulighed for at udtrække statistikker over tilstandskarakterer på udvalgte elementtyper, dvs. elementer, der er oprettet på samme prototype.



Monitering / overvågning
Moniteringsdata, f.eks. fra indbyggede sonder, gemmes, analyseres og præsenteres som datalister eller diagrammer.

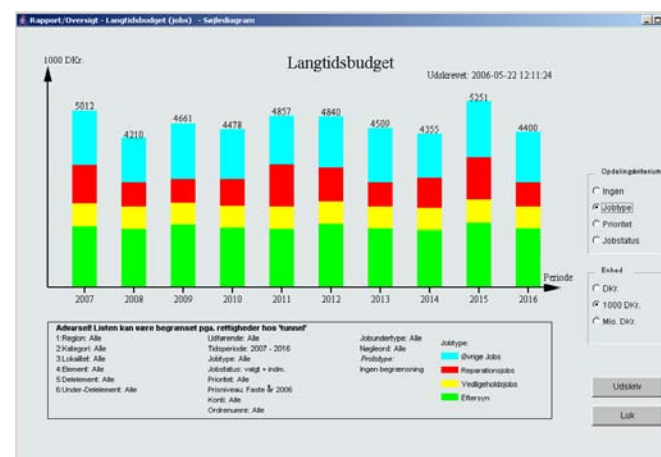
Der er mulighed for at oprette flere forskellige links til det samme dokument, links til eksterne dokumenter og links til websider.

Dokumenthåndtering
Alle typer dokumenter – forstået i bredeste forstand som alt, der er gemt som en digital fil – kan vedhæftes til alle registrerede elementer, til job og til tilstandsregistreringer i generaleftersyn.

Omfattende søgeredskaber gør det enkelt at finde dokumenter. Med andre ord, SMART kan erstatte de traditionelle arkiver.

Håndtering af forskellige konstruktioner – separat og samlet

Infrastrukturanlæg er meget forskellige i sammensætning, kompleksitet og størrelse, men principperne for en systematisk vedligeholdstyring er universelle. Definitionen af de anlæg, hvor vedligeholdet skal styres med SMART, er baseret på et unikt prototype-koncept, som tillader brugeren at anvende tilstandsregistreringen, aktivitetsstyring, budgettering, monitering og dokumenthåndtering på meget forskellige konstruktioner. Således bruges SMART til styring af vedligehold på så forskellige konstruktioner som havne, veje, små broer, store broer, tunneller, rørunderføringer, vandforsyningssystemer, kloaksystemer og vindmøller. Når en installation er rettet mod et begrænset konstruktionsområde, navngives den efter de pågældende anlæg: SMART Ports, SMART Bro, SMART Vej, osv.



SMART Mobil

Indmelding af job og rapportering om udførelsen - inkl. tilknytning af fotos, skitser mv. - kan ske via en trådløs, håndholdt PDA med online forbindelse til databasen.