

TEKNISK RAPPORT

Civil Structural Health Monitoring (CSHM)

Tillståndsbedömning genom mätning anpassad för anläggningskonstruktioner

Arvid Hejll och Björn Täljsten

Institutionen för Samhällsbyggnad
Avdelningen för Byggkonstruktion
Forskningsgruppen Innovativa Material och Konstruktioner

2005:33 • ISSN = 1402-1536 • ISRN = LTU-TR--05/33--SE

TILLSTÅNDSBEDÖMNING GENOM MÄTNING ANPASSAD FÖR
ANLÄGGNINGSKONSTRUKTIONER

FÖRORD

Tillståndsbedömning genom mätning sk SHM (Structural Health Monitoring) ibland CSHM (Civil Structural Health Monitoring) har stora möjligheter att bli ett effektivt instrument för att förbättra underhållsprocessen för anläggningskonstruktioner. Tillståndsbedömning och mätningen måste dock alltid kopplas till beräkningsmodeller och anläggningens tillstånd och den bör också pågå under en längre tidsperiod. Användandet av avancerad mätutrustning för att undersöka tillståndet hos befintliga anläggningar eller för att kartlägga beteendet t ex i samband med överlast, fel i arbetsutförande eller feldimensionering har under de senaste 10 åren ökat väsentligt – inte lika mycket i Sverige som i omvärlden, men även i vårt land har ett flertal exempel där mätning på konstruktioner gett mycket värdefull information.

Ett problem har dock visat sig vara den bristande kunskap som de flesta inom byggnadsindustrin besitter när det gäller möjligheter med SHM och hur de olika teknikerna kan och bör tillämpas. Ett större samarbete med andra discipliner är nödvändigt.

I denna rapport ges en översiktlig generell beskrivning av SHM. Dessutom presenteras ett stort antal olika mättekniker och hur de används, speciellt fokuseras här på fiberoptiska sensorer. I tillägg redovisas kort några tillämpningar med SHM.

Författarna vill här också passa på att tacka såväl SBUF (Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond) som Skanska Teknik AB utan vilkas ekonomiska stöd denna rapport inte kommit till.

Stockholm december 2005

Arvid Hejll och Björn Täljsten

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1	<i>Inledning</i> _____	1
1.1	Bakgrund _____	1
1.2	Målsättning _____	1
1.3	Begränsningar _____	1
2	<i>Inledning till CSHM</i> _____	3
2.1	Inledning _____	3
2.2	Diagnostik - kartläggande _____	4
2.3	Ackvisitionssystem _____	4
2.4	Sensorsystem _____	5
2.5	Kommunikationssystem _____	5
2.6	Lagringssystem _____	6
2.7	Utvärdering _____	6
3	<i>Strategi för CSHM</i> _____	7
3.1	Bakgrund _____	7
3.2	Periodisk eller kontinuerlig mätning _____	7
3.3	Inspektion _____	8
3.4	Korttidsmätning _____	8
3.5	Långtidsmätning _____	9
3.6	Lokala mätningar jämfört med globala mätningar _____	9
3.7	Skadeidentifiering _____	10
4	<i>Mätteknik</i> _____	11
4.1	Sensorbaserade mätsystem _____	11
4.2	Sensorer och omvandlare _____	12
4.3	Signalöverbrygging _____	12
4.4	Dataöverföring _____	12
4.5	Förstärkare _____	13
4.6	Filter _____	13
4.7	Dataframställning och efterbehandling _____	14

TILLSTÅNDSBEDÖMNING GENOM MÄTNING ANPASSAD FÖR
ANLÄGGNINGSKONSTRUKTIONER

4.8	Prestanda	14
5	Sensorsystem	15
5.1	Allmänt	15
5.2	Traditionella sensorer	15
5.2.1	Accelerometrar	15
5.2.2	LVDT	18
5.2.3	Folietöjningsgivare	19
5.2.4	Temperaturgivare	21
5.3	Fiberoptiska sensorer (FOS)	22
5.3.1	Allmänt	22
5.3.2	Teori bakom fiberoptisk mätning	23
5.3.3	Material för optiska fiber	24
5.3.4	Livslängd	25
5.3.5	Sensorer	25
5.3.6	Hantering och installation av fiberoptiska system	33
6	Användningsområden för FOS	35
6.1	Allmänt	35
6.2	Töjningsmätning	35
6.3	Temperaturmätning	35
6.4	Detektering av klorider	36
6.5	Sprickdetektering	36
6.6	Integrerade optiska sensorer	37
6.7	Trafikövervakning	38
7	Tillståndsbedömningar och uppgradering av tre betongbroar.	39
7.1	Bakgrund	39
7.2	Kallkällebron i Luleå	40
7.3	Luossajokkbron i Kiruna	42
7.4	Tvårbanebroarna i Stockholm	44
8	Framtida forskning	45
	Referenser	47
	Ytterligare referenser av intresse	53

TILLSTÅNDSBEDÖMNING GENOM MÄTNING ANPASSAD FÖR
ANLÄGGNINGSKONSTRUKTIONER

1 INLEDNING

1.1 Bakgrund

Utvecklingen av mät- och sensorteknik för konstruktiv mätning har under de senaste 10 åren varit omfattande. Den mest avancerade tekniken används tidigt för övervakning av avancerade konstruktioner med stora påkänningar, t ex flygplan och rymdfarkoster. I och med den snabba utvecklingen har priserna på mätutrustning och sensorer sjunkit kraftigt samtidigt som fler typer av sensorer utvecklats. Behovet av kontinuerlig mätning är fortfarande störst inom flyg, rymd och bilindustrin, men en allt större efterfrågan kan också skönjas inom byggindustrin. Behovet att förstå hur konstruktioner beter sig under såväl uppförande som över tid fångar allt mer intresse. En orsak är de ökade krav som ställs på våra konstruktioner i form av ökade trafikvolymmer och laster. En annan orsak är den ständigt pågående nedbrytningen av våra konstruktioner, t ex armeringskorrosion orsakad av tösalter. Ytterligare en orsak kan vara att vi idag bygger allt mer komplicerade konstruktioner där varken fullständiga beräkningsmodeller eller laboratorieförsök är möjliga att utveckla – uppföljning genom mätning kan här ge oss mycket värdefull information för framtiden, speciellt om mätningen kombineras med avancerad beräkningsmetodik och kompletteras med laboratorieförsök.

Luleå tekniska universitet, avdelningen för byggkonstruktion, har en lång tradition när det gäller mätning i fält på verkliga konstruktioner, detta har också gett oss möjligheten att utveckla en strukturerad systematik och angreppssätt som vi benämner CSHM (Civil Structural Health Monitoring). Nedan beskrivs denna systematik tillsammans med en relativt ingående beskrivning av olika sensortyper med fokus på fiberoptiska sensorer (FOS).

1.2 Målsättning

Målsättning med följande rapport är att lyfta fram möjligheter med CSHM för byggbranschen i allmänhet och för anläggningskonstruktioner i synnerhet. Rapporten har som syfte att öka det allmänna kunnandet om området och förhoppningsvis skapa ett större intresse och förståelse hos de personer som tar sig tid att läsa rapporten.

1.3 Begränsningar

Rapporten ger endast en övergripande inblick i möjligheterna med CSHM och det har inte heller varit författarnas syften att täcka in hela ämnesområdet. Därtill bör nämnas att författarnas bakgrund medför att rapporten är skriven utifrån byggperspektivet och den torde med största sannolikhet te sig annorlunda om specialister inom mätteknik författat innehållet.

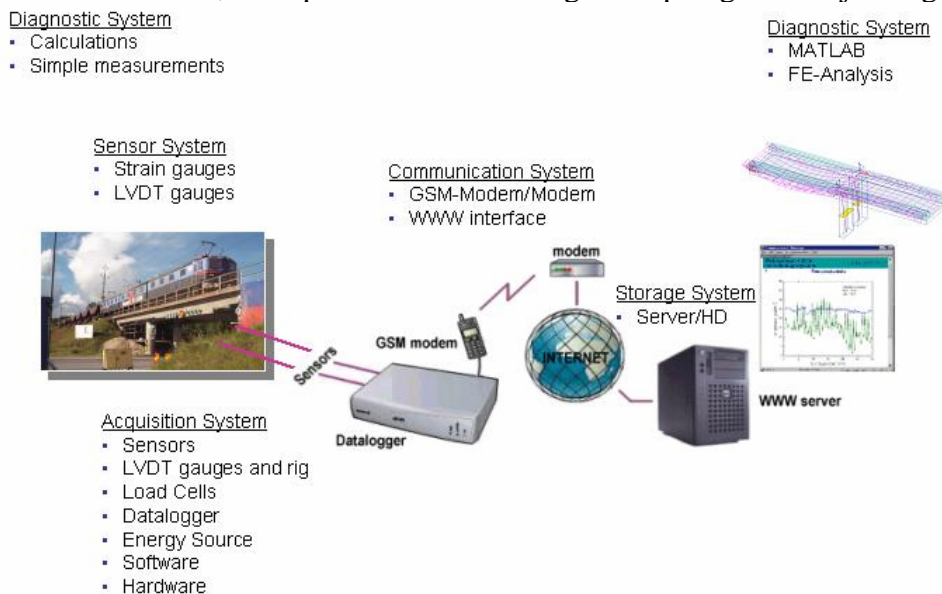
TILLSTÅNDSBEDÖMNING GENOM MÄTNING ANPASSAD FÖR
ANLÄGGNINGSKONSTRUKTIONER

2 INLEDNING TILL CSHM

2.1 Inledning

För att resultaten från mätningen skall komma till så stor användning som möjligt är det viktigt att ett strukturerat mätningsförfarande tillämpas.

Här beskrivs en utarbetad systematik som faller inom området CSHM (Civil Structural Health Monitoring) det finns egentligen inget bra motsvarande uttryck på svenska som täcker hela området och av den anledningen används genomgående i rapporten den engelska akronymen. CSHM innebär kortfattat att man först ställer en diagnos på den befintliga konstruktionen, denna kan vara övergripande och omfatta t ex sprickbildningar, beräkningar och enklare mätningar. Den kan också vara mer avancerad och då även omfatta såväl numeriska beräkningar (FE-analys) som sannolikhetsbaserade analyser. Diagnostiken ger grunder till vad som ska mätas och vad syftet med mätningen är. Här ingår även att bestämma vilket ackvisitionssystem som skall användas. Sensorer och kommunikationssystem etableras, likaså hård- och mjukvara för lagring. Till detta kopplas sedan ett mer omfattande utvärderingssystem vars syfte är att kartlägga effekten av mätningen kopplat till en mer detaljerad modell av konstruktionen. Utifrån detta kan man sedan föreslå åtgärder eller endast följa upp befintlig konstruktion över tiden – vilket man finner mest lämpligt beroende på säkerhet, ekonomi, framkomlighet osv. I figur 2.1 visas exempel på hur ett CSHM system kan utformas, exemplet är från en verklig tillämpning från en järnvägsbro.



Figur 2.1 Förslag på CSHM system – Mätning på en järnvägsbro

I det aktuella fallet i figur 2.1 genomfördes först en omfattande beräkning av bronns kapacitet och dess behov av förstärkning klargjordes, dvs diagnosen ställdes. Därefter valdes sensorer, vilket i detta specifika fall var töjningsgivare, deformationsmätare (LVDT) samt accelerometrar. Även kommunikationssystemet och lagringssystemet etablerades vid denna tidpunkt.

Mätning, registrering och utvärdering av data gjordes därefter kontinuerligt, under en viss tidsrymd, sk. Periodisk mätning. Resultaten från mätningen jämfördes därefter med teoretiska beräkningsmodeller. Projektet fortgår ännu idag. Nedan beskrivs kortfattat de olika delarna i ett CSHM system.

2.2 Diagnostik - kartläggande

Det förutsätts att byggnader och anläggningar följs upp och att orsaken till att ett CSHM system behövs är att man är osäker på konstruktionens uppförande, vill skaffa sig bättre underlag för eventuella insatsåtgärder eller få en ökad kontroll av konstruktionen. I bästa fall skulle ett CSHM system kunna användas för att optimera underhållsinsatser. Kartläggandet i detta skede kan för en bro t ex innebära att den klassningsberäknats och dessa beräkningar visat att någon typ av åtgärd är nödvändig, t ex förstärkning. Hur diagnosen genomförs avgörs från fall till fall och är förstås beroende på ett stort antal olika faktorer, t ex anläggningens betydelse, finansiella möjligheter och framtida behov.

2.3 Ackvisitionssystem

Ackvisitionssystemet omfattar hela mätsystemet, dvs strömtilförsel, mjukvara i form av utvärderingsprogram och mätprogram, hårdvara i form av logger och datorer. Även lagringsmedia ingår i ackvisitionssystemet, denna kan utgöras av t ex flyttbara minnen. Vanligtvis lagras dock data i en databas på en server som skyddad för intrång och yttre påverkan i form av t ex brand. Ackvisitionssystemet omfattar även mätsensorer, t ex töjningsgivare, fiberoptiska sensorer för sprickmätning mm., samt kommunikationsutrustning.

Kommunikationsutrustningen kan i sitt enklaste utförande utgöras av direkt transport av data med hjälp av flyttbara minnen. Mer effektivt är då att nyttja telefonlinjer, GSM-, 3G-telefon eller i bästa fall bredbandsuppkopplingar. En viktigt del i ackvisitionssystemet är programvara för utvärdering, här ingår allt från vanliga kontorsprogram som t ex Excel till avancerad mjukvara som FE (Finita Element) – program och i vissa fall speciell mjukvara för att hantera mätdata.

2.4 Sensorsystem

När behovet och kartläggningen av konstruktionen genomförts gäller det att välja sensor för det behov man har. Det finns ett stort antal olika typer av sensorer att tillgå, men det viktigaste är att veta vad man ska mäta. Sensorerna kan delas upp i olika kategorier beroende på vad som ska undersökas. Ett förslag på kategorier och vilka sensorer som är lämpliga har sammanställts i tabell 2.1. Generella koncept beskrivs mer ingående längre fram i rapporten.

Tabell 2.1 Fysiska storheter som används inom CSHM – karakteriserat efter mätbehov

	Sensor
Förskjutning	LVDT (Linear Variable Differential Transformer) Långa fiberoptiska givare (interferometri) Accelerometrar och tidsbaserad numerisk integrering (transienta signaler) Optisk laser triangulering GPS
Hastighet	Accelerometrar och tidsbaserad numerisk integrering (transienta signaler) Geofoner
Acceleration	Piezoelektriska accelerometrar Kraft-balanserade accelerometrar Kapacitansfria accelerometrar
Töjning	Traditionella elektriska töjningsgivare Fiberoptik (Bragg gratings) Långa fiberoptiska givare (interferometri)
Kraft	Traditionella elektriska töjningsgivare Piezoelektriska givare
Temperatur	Termometrar Termoelement Termistor
Fukt	MEMS sensorer

2.5 Kommunikationssystem

Kommunikationssystemet avser dels kommunikation mellan mässystemets olika delar men också överföring av data från mätplats till plats för utvärdering. Det första fallet diskuteras mer ingående nedan.

I det senare fallet kan kommunikationssystemet i sin enklaste form bestå av flyttbara minnen, typ CD-skivor, USB minnen etc. Kommunikationssystemet kan också bestå av GSM-, modem- eller bredbandslänkar. Det beror bl a på objektets placering och mängd av data som skall överföras. Det är inte heller alltid nödvändigt att överföra all data, utan endast den data som anses ha betydelse för utvärderingen överförs.

2.6 Lagringssystem

En viktig parameter hos lagringssystemet är att man även i framtiden skall kunna få åtkomst till lagrad data. Normalt lagras man då originaldata i ett format och behandlad data, t ex diagram och kurvor, i ett annat. Lagring kan göras på flera olika media allt från vanliga CD-skivor till mer avancerade databaser i nätverk. När man diskuterar lagring av data skall man försöka ha en tidsaspekt av åtminstone 10 år i åtanke –detta måste avgöras från fall till fall.

2.7 Utvärdering

Förutsatt att mätningen är korrekt utförd och data sparats är utvärderingen den absolut viktigaste delen i CSHM. En utvärdering kan göras på flera olika sätt beroende på vad som efterfrågas. Har t ex endast ett tvärsnitt av anläggningen studerats kan relativt enkla handberäkningar tillsammans med mätdata ge mycket information om konstruktionens beteende. För mer omfattande studier används FE-program, där såväl 2D som 3D analyser är bra hjälpmedel om de kopplas ihop med uppmätt och utvärderad data, verkliga materialvärden och laster. Utvärderingen kopplas självklart även till diagnosen som ställdes innan mätningen påbörjades. Utvärderingen är en fortsättning av diagnosen och normalt används mätdata för kalibrering och i vissa fall för extrapolering. Under senare år har det också blivit allt mer vanligt att sannolikhetsbaserade beräkningsmetoder som tar hänsyn till verkliga laster, materialdata och dess spridning används tillsammans med numeriska beräkningsmetoder och mätdata.

3 STRATEGI FÖR CSHM

3.1 Bakgrund

Normalt används CSHM vid kontroller av tillståndet på existerande konstruktioner, t ex. för att kontrollera stabilitet eller funktionen hos en konstruktion. Fram tills idag används mest regelbundna visuella inspektioner för att kontrollera eller följa upp en konstruktion. Mer avancerade mätmetoder och övervakningssystem har dock använts i olika forskningsprojekt på byggkonstruktioner där syftet varit att till exempel verifiera strukturteorier eller nedbrytningsmekanismer. I denna rapport är strategin för CSHM uppdelad i tre huvuddelar:

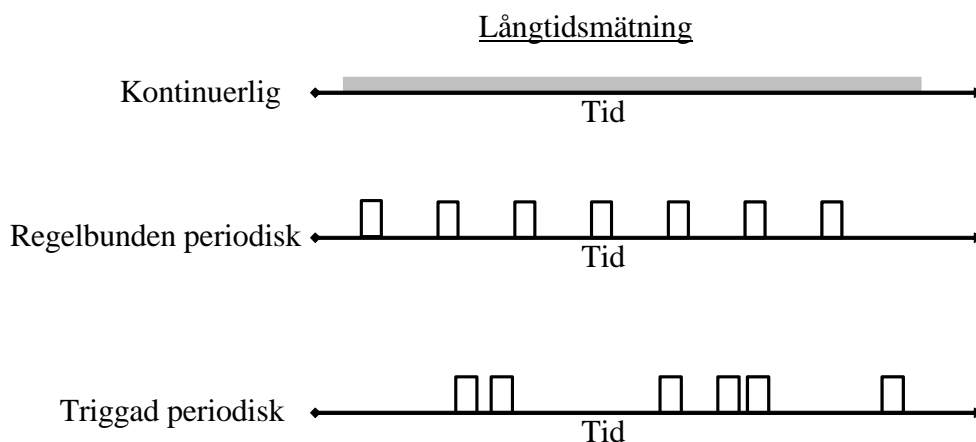
- Inspektion
- Kortidsmätning
- Långtidsmätning

Inspektioner görs regelbundet för att kontrollera att inget oförutsett har hänt med konstruktioner. Kortidsmätning är ofta oplanerade och en följd av att någonting oförutsebart har inträffat eller som ett resultat från en inspektion. Långtidsmätningar kräver god planering då sensorer, utrustning och analyser skall fortlöpa under en lång tidsrymd. Optimalt är om sensorerna kan appliceras under bygget av konstruktionen.

3.2 Periodisk eller kontinuerlig mätning

Utöver ovanstående uppdelning bör mätstrategin kategoriseras. Både periodisk mätning och kontinuerlig mätning är långtidsmätningar. Periodisk mätning definieras av att mätningen sker regelbundet i tidsstyrda perioder eller att den startar efter en triggningsignal (en signal som utlöses av en händelse, t ex en töjning över en referenstöjning) och stoppar efter en förutbestämd tid, i figur 3.1 visas detta schematiskt.

Vid kontinuerlig mätning samlas mätdata in med samma frekvens över en förutbestämd tid eller tills mätningen stoppas för hand. Mängden mätdata kan bli ett problem om samplingsfrekvensen är för hög. Snabba skeenden på konstruktionen som till exempel ett tåg som passerar en bro, kan vara svåra att se om frekvensen är för låg. Kontinuerlig mätning är användbart då man vill studera långsamma händelser, t ex inverkan av temperaturförändringar.



Figur 3.1 Långtidsövervakning med kontinuerlig, periodisk med bestämd frekvens samt periodiskt med utlösande faktorer, efter Hejll (2004)

3.3 Inspektion

Inspektioner av anläggningskonstruktioner har fördelen att de är enkla och billiga att utföra och det är en vedertagen och välkänd teknik som används. Metoden har dock begränsningar då resultatet endast kan ge en grov bedömning av tillståndet.

Metoden ger också bara information om ytan på konstruktionen därför kombineras en inspektion ofta med enklare icke-förstörande mätmetoder. Inspektioner används för att styra underhållet, t ex målning, byte av slitedelar mm. Då inspektioner är utförda av människor, ofta personer med stor erfarenhet, kan olika personer som inspekterar skador bedöma samma skada olika – vilket gör det svårt att erhålla ett optimalt underhåll.

3.4 Korttidsmätning

I jämförelse med inspektioner kan instrumentering och mätning av kritiska eller svårkomliga delar på en konstruktion ge mer och tydligare information. Inspektion kan dock ge en bra bedömning av var sensorer skall placeras för att ge bäst information. Kostnaden för mätsystem och installationen av detta kan sällan motiveras med avseende på minskat underhåll. Vidare har de flesta sensorer kortare livslängd än anläggningskonstruktionen de är ämnade att mäta på, därför används korttidsmätning i största utsträckning vid provning av nya konstruktioner eller i samband med stora reparations- eller förstärkningsarbeten då också prestanda måste kontrolleras.

Även mätsystemet i sig bör diskuteras då de flesta system inte är automatiskt triggade utan en stor mängd data samlas in och analyseras i efterhand. Därför är i stort sett alla system engångssystem som installeras och används under kort tid trots kostnaderna för systemet ofta är höga. Då ett korttids-mätsystem används flera gånger kallas det oftast periodisk långtidsmätning

3.5 Långtidsmätning

Då ett mätsystem används under lång tid kan informationen ge ägaren till konstruktionen ett bättre beslutsunderlag med avseende på anläggningens prestanda, vilket då även styr omfattningen av underhåll, reparation och/eller förstärkning. Det är då möjligt att anpassa nedbrytningsmodeller med mätdata från konstruktionen i fråga och på så sett optimera underhåll vilket ger mindre livscykelkostnader.

Som tidigare nämnts behövs sensorer som är robusta och pålitliga nog att ge mätdata under hela livslängden på konstruktionen. Många sensorer är idag inte anpassade för att mäta under så många år. Att bygga ett mätsystem som motsvarar livslängden på en anläggningskonstruktion kan därför vara ett problem.

Nya lovande sensorer av typen fiberoptiska sensorer är under utveckling och har utvecklats enormt de senaste årtiondena, se kommande kapitel. Andra sensorer och mätmetoder användbara för långtidsmätningar är ”mätfärg”, elektrisk ledande plast, akustisk emission, GPS-system och accelerometrar tillsammans med modalanalys.

3.6 Lokala mätningar jämfört med globala mätningar

Det finns två sorters konstruktionstekniska mätningar, lokala och globala. De flesta sensorer beskrivna i denna rapport är anpassade för lokala mätningar. Även om en konstruktion är utrustad med ett stort antal lokala sensorer av olika typer och på ett stort område täcker de ändå bara en del av konstruktionen. Dessa sensorer är ofta mycket användbara då en viss del av en konstruktion skall mätas, som exempel kan nämnas vid en synlig skada eller i laborationsmiljöer där randvillkor och kritiska områden är kända. Mätningar där lokala sensorer används i större eller mindre utsträckning kallas ofta CSHM trots att endast en liten del av konstruktionen kontrolleras.

För att mäta globalt behövs andra parametrar eller metoder som ger information om hela konstruktionen. Nedböjning är ett exempel på en global parameter medan töjning är en typisk lokal parameter. Om nedböjningen på en bro ökar, trots att laster och temperatur är konstanta måste det finnas en skada vid stöd eller en minskning i styvhet hos bron. Tyvärr är nedböjning relativt svårt att mäta i fält då det är svårt att hitta en pålitlig referenspunkt. Därför används nedböjning relativt sällan i CSHM speciellt när det gäller långtidsmätningar.

3.7 Skadeidentifiering

Den metod som är mest utbredd för att identifiera och hitta skador på konstruktioner med hjälp av sensorer är modalanalys. Tanken bakom metoden är att de modala parametrar, som till exempel egenfrekvens, modformer och modal dämpning är baserade på fysiska egenskaper hos hela konstruktionen, där massa, styvhet, friktion och dämpning kan nämnas. En skada i konstruktionen ger således upphov till ändringar i de fysiska egenskaperna och de modala parametrarna ändras, Doebling et. al. (1996). Skadeidentifiering delas normalt upp i följande tre steg:

- Steg 1. Fastställande om skada är närvarande i konstruktionen
- Steg 2. Lokalisering av skadan i konstruktionen
- Steg 3. Kvantifiering av skadan

I litteratur används ibland ett fjärde steg; uppskattning av en konstruktionsresterade livslängd. Steg fyra är oftast inte inkluderat i en skadeidentifiering då metoder att uppskatta återstående livslängd är baserade på vilken typ av skada som är närvarande. För sprucken betong kan man till exempel använda sig av brottmekanik eller utmattningsanalys. Denna lista presenterades av Rytter (1993) och är allmänt vedertagen i CSHM.

Ett optimerat skadeidentifieringssystem skall kunna detektera en skada tidigt för att sen bli lokaliserat med en noggrannhet som motsvaras av tätheten på mätsensorerna.

Systemet skall också ge information om skadans grad. Beroende på vilken typ av skada som är detekterad och lokaliseringen på denna kan sedan en modell för återstående livslängd skapas. Systemet skall i också vara så automatiskt som möjligt och i så liten utsträckning som möjligt vara beroende av ingenjörsmässiga bedömningar. Ett mer troligt framtidsmål att nå inom nära förestående tid är att utveckla ett system som jämför mätningar med initiala mätvärden och på så sett kan ge en skadeidentifiering. System av denna typ med analyser av vibrationer används idag ibland annat vattenkraftsindustrin på turbiner.

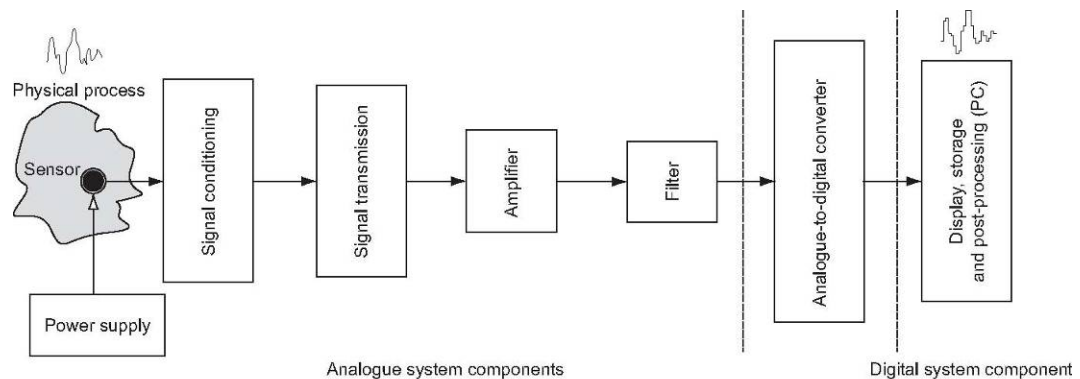
4 MÄTTEKNIK

4.1 Sensorbaserade mätsystem

Man kan enligt ovan samt enligt Hejll (2004), definiera tre olika typer av tidsförlopp, kontinuerligt, periodiskt med ett bestämt tidsintervall och periodiskt med utlösande faktor t ex där man samlar in data vid en viss last, temperatur, töjning osv. Detta visas schematiskt i figur 4.1. Antingen samlar man in data kontinuerligt över lång tid, detta är dock ovanligt då det genererar stora mängder information. Insamling vid vissa tidpunkter, sk periodisk frekvent mätning är då ett alternativt. Detta sätt fungerar bra när man mäter temperatur och trafikflöde över en längre tid. En svårighet är att man inte kan styra exakt över datainsamlingen. Bättre är då datainsamling som styrs av trafik, last som överstiger en viss nivå sk. Triggad mätning. Mängden data bli mindre och man får en bättre kontroll över såväl mätningen som resultat.

Ett övervakningssystem för anläggningskonstruktioner använder sensorer för mätning vilket då ger empirisk information om konstruktionen inom ett visst tidsförlopp – ofta över en längre tid.

Ett sensorbaserat mätsystem är en kombination av sensorer, signalbehandling, datainsamling, omvandling och presentation av det man önskar mäta och/eller framställa. Detta kan t ex vara temperatur, förskjutningar och töjningar i en sektion av en bro för att följa upp prestanda eller för att erhålla emiriska data i t ex beräkningsmodeller.



Figur 4.1 Blockdiagram över ett traditionellt mätsystem, Sustainable Bridges (2004)

Det sensorbaserade mätsystemet består av flera delar som utför olika funktioner. Sensorn är den komponent som känner av en specifik kvantitet av den fysiska processen och skapar en elektrisk puls baserad såväl på storlek och tidsrymd. Den elektriska pulsen signalbehandlas och förstärks samt filtreras innan den sänds vidare och omformas från analog till digital signal. Utdata blir härifrån en ström av digitala data, tidserier, vilka visas, lagras och efterbehandlas genom en digital dataprocessenhet, vanligen en PC. Nedan förklaras ingående delar och moment mer utförligt.

4.2 Sensorer och omvandlare

En omvandlare (*transducer*) är en utrustning som omvandlar en fysisk enhet eller egenskap till en motsvarande men med en annan fysisk form. I tillämpningar inom byggnadstekniken kan sex olika fysiska former urskiljas, dessa är: mekanisk, termisk, elektrisk, magnetisk, kemisk och strålning. Varje utrustning som omvandlar någon av dessa former till en annan är en omvandlare. Till exempel, en termograf omvandlar temperatur (termisk) till förändringar i förskjutning (mekanisk) av en skrivande nål (penna).

Omvandlare som omformar en fysisk egenskap till en elektrisk signal benämns ofta sensor. En termograf är därför inte en sensor. Däremot är en accelerometrar en sensor eftersom den omformar acceleration (mekanisk) till volt (elektrisk). Ibland används omvandlare och sensors synonymt, t ex för strålning motsvarar detektorer sensorer. I tabell 2.1 redovisas de mest vanliga sensorerna för byggnadstekniska tillämpningar. Elektrisk utdata från en sensor benämns vanligen (elektrisk) utsignal.

4.3 Signalöverbrygging

En utrustning för signalöverbrygging fångar upp den primära elektriska signalen från sensorn och omformar den till en elektrisk signal som är bättre lämpad för överföring, modifikation, förstärkning och registrering. Den välkända Wheatstone bryggan omformar t ex den primär utsignalen från en elektrisk folietöjningsgivare till spänning (volt) vilket är mycket enklare att överföra och processa.

4.4 Dataöverföring

Normalt är anläggningskonstruktioner stora. I de fall en omfattande mätning utförs är sensorerna utplacerade över en stor yta, dess data måste överföras över långa avstånd innan de kan samlas in av datainsamlingsenheten. För att undvika förvanskning eller förlust av data är utformandet av mätsystemet väsentligt.

Dataöverföring sker antingen analogt (volt) eller som datapaket (digitalt). I det senare fallet sker signalöverbryggningen, förstärkning, filtrering och digital omvandling innan dataöverföring till den centrala datainsamlingsenheten. Data kan också överföras som elektriska signal i kablar eller som elektromagnetiska vågor med hjälp av antenner. När man använder sig av trådlös dataöverföring är data vanligtvis packad som små dataenheter. Kablad dataöverföring kan ske med t ex kopparledning, koaxialkablar, fiberoptiska kablar för att nämna några överföringar.

4.5 Förstärkare

Förstärkare är typiska komponenter i ett mätsystem. Dom används såväl för signalbryggning som förbehandling innan digital omvandling. En förstärkare har två viktiga funktioner:

- Öka signalen och minska bruset (Signal to Noise Ratio – SNR)
- Öka upplösningen av signalen

Den analoga utsignalen från en sensor är typiskt en lågnivå signal. Sensorer som är placerade långt från datainsamlingsenheten påverkas ofta av elektriskt brus. Förstärkning av utsignalen efter det att den har överförts ökar även bruset med samma förstärkningsnivå. Om bruset är i samma storlek som signalen från sensorn då kan väsentlig information helt försvinna i bruset, vilket leder till meningslös mätning. I motsats till detta om utsignalen från sensorn förstärkas innan den överförs väsentligt öka utsignalen i förhållande till bruset, vilket ökar SNR.

Modern mätutrustning registrerar och lagrar data i digitalt format. Med det menas att mätdata representeras som en sekvens av binära siffror. I motsats till detta är utsignalen från sensorerna vanligtvis analog. Omvandlingen från analog till digital signal är en viktig process och genomförs en analog-digital omformare (ADC – analog – digital – converter). ADCs kräver en analog insignal inom specificerad amplitud, vilket normalt endast är inom ett antal få volt. Därför, för att avsevärt förbättra upplösningen, måste ut signaler från sensorn förstärkas, vilket oftast har ett omfång i millivolt, innan signalen kan behandlas av en ADC.

4.6 Filter

Filtrering avlägsnar oönskade frekvenser, vanligtvis brus, från en signal. Till exempel analoga distorsionsfilter används för att avlägsna högfrekvent brus från en signal innan den sänds vidare till ADCn för digitalisering. Digitala filter appliceras under efterbehandling av mätserier för att extrahera specifik information från data.

4.7 Dataframställning och efterbehandling

Efterbehandling och framställning av data görs oftast med datorer och lämplig mjukvara. Det finns specialprogram men oftast kan MATLAB användas till de flesta behov.

4.8 Prestanda

Kvalitén och resultatet från mätningen beror på egenskaperna hos det sensorbaserade system som används. Den prestanda man eftersträvar kan variera mycket från objekt till objekt, men man ska förstås försöka välja en så kostnadseffektiv lösning som möjligt. Det är svårt att generellt säga vilken prestandanivå man ska välja, men för varje objekt skall man försöka specificera frekvensområde för in- och utsignal, upplösning på utsignalen, bandvidd för mätinstrument, reaktionstiden mellan in- och utsignal, noggrannhet på sensorer, möjlighet att upprepa mätning, avdrift, temperaturinverkan osv. Det är således många olika faktorer att ta hänsyn till och överläggning med specialist är att rekommendera.

5 SENSORSYSTEM

5.1 Allmänt

Sensorer i allmänhet används för att förvandla fysikaliska storheter till information som vi människor kan förstå och utvärdera. Ett bra exempel är en termometer som visar expansionen av kvicksilver eller annan vätska när temperaturen ökar. Anders Celsius bestämde att en viss expansion skulle motsvara skillnaden mellan fruset och kokande vatten med andra ord 100° C, Utsi (2000).

För mätningar på anläggningskonstruktioner finns en mängd olika sensorer. Systemet av sensorer måste vara anpassat speciellt för det ändamålet med mätningen. I tabell 5.1 beskrivs de vanligaste sensorerna anpassade för mätningar på anläggningskonstruktioner. Många av de nämnda sensorerna är dock inte anpassade för långtidsmätningar. Dock är det en sensor som kan mäta över såväl kort som lång tid och lokalt samt lokalt, dessutom detektera skador, t ex sprickor i betongkonstruktioner. Detta är den fiberoptiska sensorn. Av den orsaken lägger detta kapitel tyngdpunkten på fiberoptiska givare, men även så kallade traditionella givare diskuteras.

Tabell 5.1.Sensorer nyttjade inom mätning på anläggningskonstruktioner.

Sensor	Global	Lokal	Skador	Korttid	Långtid
Accelerometrar	x	-	x	(x)	(x)
Töjningsgivare, limmad	-	x	-	x	-
Töjningsgivare, svetsad	-	x	-	x	(x)
Vibrerande sträng	(x)	x	-	x	x
Nedböjning, LVDT	x	-	-	x	(x)
Akustisk emission	x	-	x	x	(x)
Fiberoptiska sensorer	(x)	x	x	x	x

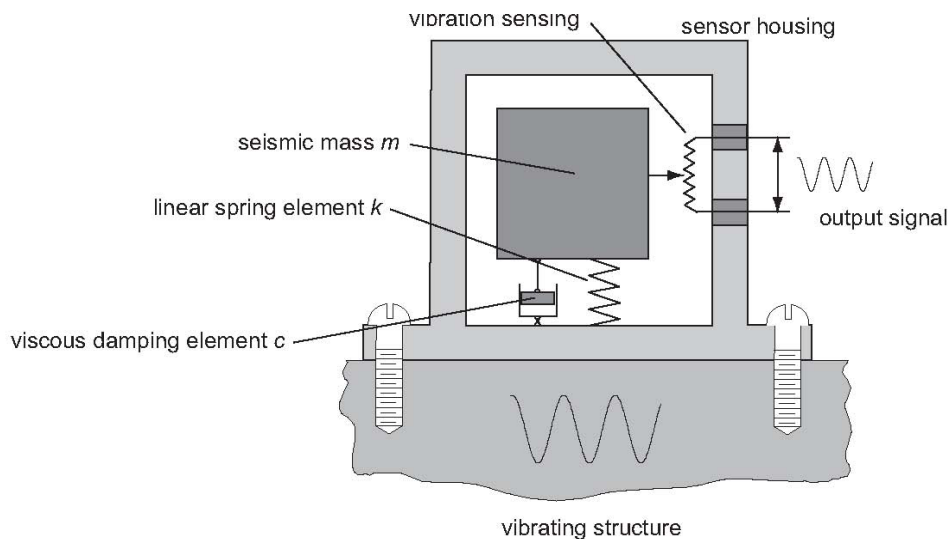
x=väl lämpade, (x) fungerar, - = rekommenderas ej

5.2 Traditionella sensorer

5.2.1 Accelerometrar

Accelerometrar används för att mäta vibrationer och snabba rörelser i konstruktioner. Dessa data används i sin tur i modalanalys och skadeidentifiering. Sensors uppgift är att förvandla acceleration till spänning (Volt). Enligt ISIS Canada (2001) är den vanligaste accelerometern av typen piezo-elektrisk kristall som skapar en spänning under tryck, böjning eller skjuvning. En accelerometer är förenklat uppbyggd av en sk. seismisk massa vilken är fäst till en elastiskt upplag (balk, membran etc.).

När givaren utsätts för acceleration, skapar den massan, m , en signifikant inre kraft som verkar mot det elastiska upplaget. Denna kraft motsvarar produkten av massan och accelerationen, enligt Newtons välkända samband: $F=ma$. Tack vare denna kraft påbörjas en mekanisk vibrering. Denna vibrering registreras och omvandlas därefter till en utsignal. I figur 5.1 visas en mekanisk modell av en accelerometer,



Figur 5.1 Mekanisk modell av accelerometer

I figur 5.1 är massan fäst till omgivande skyddshöljet som i sin tur följer rörelserna hos konstruktionen man mäter på. Massan, m , har kontakt genom ett fjäderelement, k , och en dämpare, c . Kraften som påverkar massan skapas således genom rörelser hos konstruktionen. Normalt kan accelerometrar detektera rörelser med väldigt små frekvenser. Vid små rörelser hos massan deformeras sensors yta något vilket sker som små intryckningar på den piezo-elektriska kristallen vilken i sin tur sänder ut en elektrisk utsignal. Vilken är proportionell mot accelerationen.

Normalt är massan kopplad till det piezo-elektriska elementet och ger upphov till en kraft under acceleration. Accelerometrar kan ha olika konstruktion för att skapa överföringen mellan massa och element. Normalt benämns accelerometrar i relation till hur denna överföring sker. De vanligaste konstruktionerna är tryck-, böj- och skjuvaccelerometrar. Där prestanda för den sistnämnda oftast är bäst. I fotot i figur 5.2 visas en accelerometer av skjuvtyp.

Känslighet, upplösning, amplitud och frekvensområde beror förutom på konstruktionen på massan. Ju större massa desto större känslighet och desto högre upplösning men med det följer också en lägre frekvens och minskad amplitud.

Mer information om accelerometrar ges i bl a Beckwith och Marangoni, (1990) och McConnell, (1995). I tabell 5.2 har typisk prestanda för accelerometrar sammanställts.



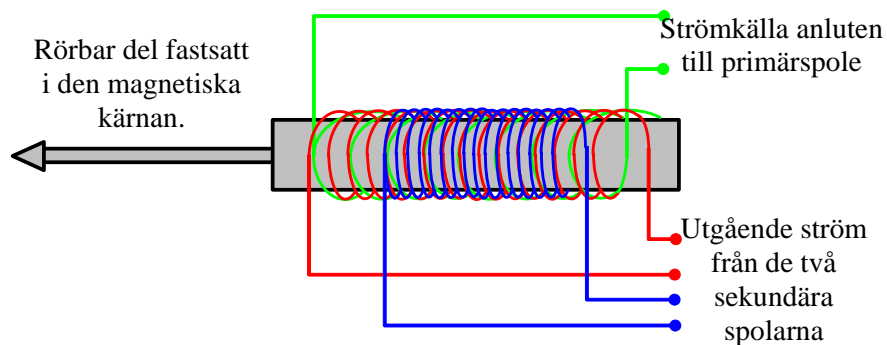
Figur 5.2 Piezoelektrisk accelerometer av skjuvtyp.

Tabell 5.2 Prestanda för accelerometrar

Prestanda	Karaktäristik
<i>Mätområde</i>	<i>Mellan ca $\pm 5 \text{ m/s}^2$ och $\pm 10000 \text{ m/s}^2$</i>
<i>Frekvensområde</i>	<i>0.1 Hz till 50 kHz</i>
<i>Temperaturområde</i>	<i>Användbara i temperaturer från $-200 \text{ }^\circ\text{C}$ – $100 \text{ }^\circ\text{C}$, beroende på typ av accelerometer och behov av upplösning</i>
<i>Mätavvikelse</i>	<i>Refereras till amplitud, 2 – 5 % avvikelse</i>
<i>Storlek och vikt</i>	<i>Stor variation, men typiskt ca 60 mm bredd och 80 mm höjd, de största väger upp till 1 kg.</i>
<i>Långtidsegenskaper</i>	<i>Piezoelektriska accelerometrar är stabila över många år. Man kan dock behöva genomföra periodisk kalibrering om mycket hög noggrannhet krävs.</i>
<i>Kostnad</i>	<i>Ca 5 000 – 15 000 kr beroende på typ av accelerometer och krav på upplösning</i>

5.2.2 LVDT

LVDT står för engelskan "Linearly Varying Displacement Transducer", eller "Linear Variable Differential Transformer" vilket kan översättas till linjärt varierande nedböjningsomvandlare, se figur 5.3 och fotot i figur 5.4.



Figur 5.3 Schematisk bild av en LVDT



Figur 5.4 Schematisk bild av en LVTD

När en strömkälla, växel- eller likström ansluts till den primära spolen skapas en spänning i de sekundära spolarna pga. det magnetfält som skapas av strömmen i den första spolen, Storleken på den utgående spänningen är beroende av positionen av den magnetiska kärnan som rör sig med konstruktionen man mäter på. På detta sätt kan nivån på spänningen översättas till förskjutning och man erhåller absoluta mått, oftast i form av 1/1000 mm. En LVDT givare måste ha en fast insättning till underlaget och förskjutningarna mäts relativt denna placering.

I figur 5.4 visas ett foto av en LVDT givare för att mäta över en spricka i en betongkonstruktion. Här är givaren fast monterad på ena sidan och en mätplatta på den andra sidan av sprickan. Givaren skall också placeras så att mätarmen kan föras i rät vinkel. Till givaren kopplas vanligen en koaxialkabel. Det är också viktigt att kabeln är fixerad så att inga rörelser överförs till givaren. Kablarna måste också vara skyddade mot elektromagnetiska störningar. I tabell 5.3 redovisas prestanda för en typisk LVDT givare.

Tabell 5.3 Prestanda för LVDT givare

Prestanda	Karaktäristik
<i>Mätområde</i>	<i>Mellan ± 0.1 mm och ± 500 mm</i>
<i>Frekvensområde</i>	<i>Ca 100 – 3000 Hz, vanligtvis ca 500 Hz</i>
<i>Temperaturområde</i>	<i>Användbara i temperaturer från -20 °C- $+150$ °C</i>
<i>Mätavvikelse</i>	<i>0.5 %</i>
<i>Storlek och vikt</i>	<i>Ca 50 mm – 2.2 m, diameter 20 – 30 mm, väger ca 15 g upp till 2.5 kg.</i>
<i>Långtidsegenskaper</i>	<i>Lämpliga för långtidsmätning (robusta) om de är korrekt monterade och används på rätt sätt.</i>
<i>Kostnad</i>	<i>Ca 5 000 – 15 000 kr beroende på typ av givare</i>

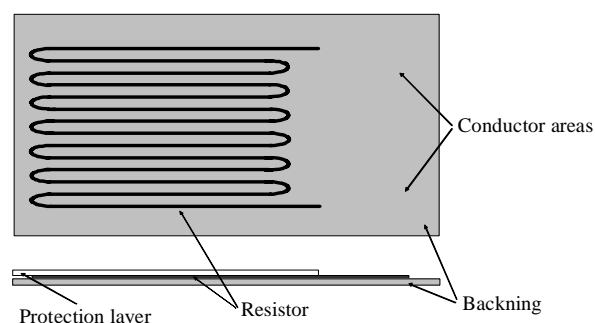
5.2.3 Folietöjningsgivare

Resistenta töjningsgivare baseras på den fysiska effekten att motståndet i en metallisk tråd ändras när den utsätts för mekanisk töjning. Om givaren tänjs blir den lägre med en mindre tvärsnittsytta. Eftersom motståndet hos en elektrisk ledare varierar i enlighet med motståndet hos materialet och längden samt tvärsnittsarean hos den elektriska ledaren ger töjningen en motståndsförändring. Givarfaktorn F beskriver känsligheten hos töjningsgivaren och definieras enligt:

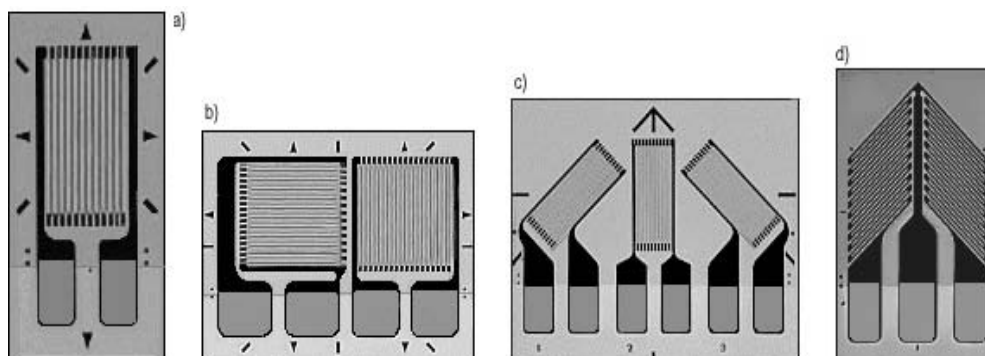
$$F = \frac{dR/R}{dL/L} = \frac{dR/R}{\varepsilon}$$

där R är motståndet hos tråden, L längden på tråden, $\varepsilon=dL/L$ är töjningen. Olika material har olika givarfaktorer. För små töjningar är givarfaktorn relativt konstant så att motståndet är proportionellt mot töjningen. Värdet på motståndet R och givarfaktorn F ges av leverantören av själva givaren.

Den mest använda och kända töjningsgivaren består av en tunn etsad metallfolie vilken är monterad på ett tunt material som bär upp folien. Folien är krökt fram och tillbaka ett flertal gånger för att på så sätt öka den effektiva längden av mätelemtet, se figur 5.5 och 5.6. Prestanda hos folietöjningsgivare styrs av metallfolien, hur den är utformad, typ av bärmaterial, hur det fästs mot underlaget, hur den är skyddad och hur strömkretsarna är anslutna.



Figur 5.5 Typiskt exempel på en töjningsgivare och dess sammansättning



Figur 5.6 Olika typer av töjningsgivare: a) enaxiella, b) biaxiella, c) triaxiell rosett, d) skjuvmönstrade

Standardmotstånd för töjningsgivare är 120 Ω , 350 Ω , 700 Ω och 1000 Ω . Den vanligaste kommersiellt använda har ett motstånd på 120 Ω . Givarfaktorn F för standardfolietöjningsgivare är vanligen kring 2.0. Därför är förändringen i resistans för en standardgivare vid 1 microstrain ($1 \cdot 10^{-6}$ m/m) $0.24 \cdot 10^{-3}$ Ω . I tabell 5.4 har generell prestanda för folietöjningsgivare ställts upp.

Tabell 5.4 Prestanda för folietöjningsgivare

Prestanda	Karaktäristik
Mätområde	Normalt (- 5% - 5 %), vissa ± 10 %
Frekvensområde	Ingen specifik nivå – tester ger > 4 MHz
Temperaturområde	Användbara i temperaturer från -250 °C- + 650 °C
Mätavvikelse	1-2 %, måste kompenseras för temperatur
Storlek och vikt	0.2 mm – ca 300mm, väger några gram
Långtidsegenskaper	Driver över tiden, ej alltid lämpliga för lång tid
Kostnad	Ca 150 – 1000 kr beroende på typ av givare

5.2.4 *Temperaturgivare*

Allmänt

Temperatur är troligen den mest förekommande parametern att mäta, orsaken är att temperaturen påverkar mer eller mindre alla fysiska processer. Mätning av töjning och förskjutning hos en konstruktion är i stort meningslös utan korrekt information om temperaturförändringarna under tiden man mäter. För närvarande används tre temperaturskalor, dessa är Fahrenheit, Celsius och Kelvin. De senare är vanliga i Europa medan den första är den vanligast använda i USA. Den vanligast förekommande temperatursensorn för CSHM är resistanstermometrar och termoelement.

Resistanstermometrar

Resistanstermometrar (RDT) består av en sensor som har förmågan att ändra ett elektriskt motstånd med förändring i temperatur. En grupp av element med resistans och som är känsliga för temperaturfluktuationer är metaller med god ledningsförmåga, exempel är nickel, koppar, platina och silver. En resistanstermometer uppvisar nära linjärt beteende mellan resistans och temperatur över ett stort temperaturspann. Motstånd av platina uppvisar bäst linjärt beteende. En annan typ av resistanstermometer är sådana tillverkade av halvledarmaterial och benämns termistorer. Dessa har normalt icke linjärt samband mellan temperatur och resistans. I tabell 5.5 redovisas prestanda för resistanstermometrar. Termometrarna kopplas till mätutrustningen med kablar som i sin ur måste temperaturkompenseras för att minska drift och felavläsning. Kalibrering görs normalt i ett vätskebad.

Tabell 5.5 Prestanda för resistanstermometrar

Prestanda	Karaktäristik
<i>Mätområde</i>	<i>Mellan -250 °C till 650 °C, termistorer ca -100 °C till 275 °C.</i>
<i>Frekvensområde</i>	<i>Från ca 1 sekund upp till flera 100 sekunder</i>
<i>Mätavvikelse</i>	<i>0.3 °C</i>
<i>Storlek och vikt</i>	<i>Ca 4 – 70 mm med en diameter av 1-5 mm och en vikt av några få gram.</i>
<i>Långtidsegenskaper</i>	<i>Lämpliga för långtidsmätning om de är korrekt skyddade mot föroreningar</i>
<i>Kostnad</i>	<i>Låg kostnad</i>

Termoelement

Termoelement är temperatursensorer som består av två olika material i kontakt med varandra. Kontakten eller kopplingen kan utföras genom att man virar materialen kring varandra, att de svetsas, löds ihop eller att man hårdlöder ihop materialen. Funktionen hos termoelement baseras på en termoelektrisk effekt vilken genererar en liten öppen strömkrets när två termoelements förgreningspunkt befinner sig vid olika temperaturer. Termoelementets krets används för att känna av en okänd temperatur i den varmare förgreningspunkten, medan temperaturen i referenspunkten eller den kalla förgreningspunkten är känd. Utsignalen beror på temperaturskillnaden mellan de två förgreningspunkterna. Normalt är denna skillnad i högsta grad icke linjär och behöver kalibreras.

Tabell 5.6 Prestanda för termoelement

Prestanda	Karaktäristik
<i>Mätområde</i>	<i>Mellan -250 °C till ca 1700 °C, beroende på vilka material som kombineras</i>
<i>Frekvensområde</i>	<i>Från sekunder till flera minuter</i>
<i>Temperaturområde</i>	<i>Användbara i temperaturer från -20 °C- + 150 °C</i>
<i>Mätavvikelse</i>	<i>0.5 C</i>
<i>Storlek och vikt</i>	<i>Ca 4 to 50 mm, diametern varierar från ca 0.25 till 5 mm. Vikten är några gram</i>
<i>Långtidsegenskaper</i>	<i>Lämpliga för långtidsmätning (robusta) förändringen är normalt liten över tiden. Dock om de används vid mycket höga temperaturer kan de genomgå kemiska och fysiska förändringar vilket innebär en större drift som måste kalibreras.</i>
<i>Kostnad</i>	<i>Låg kostnad</i>

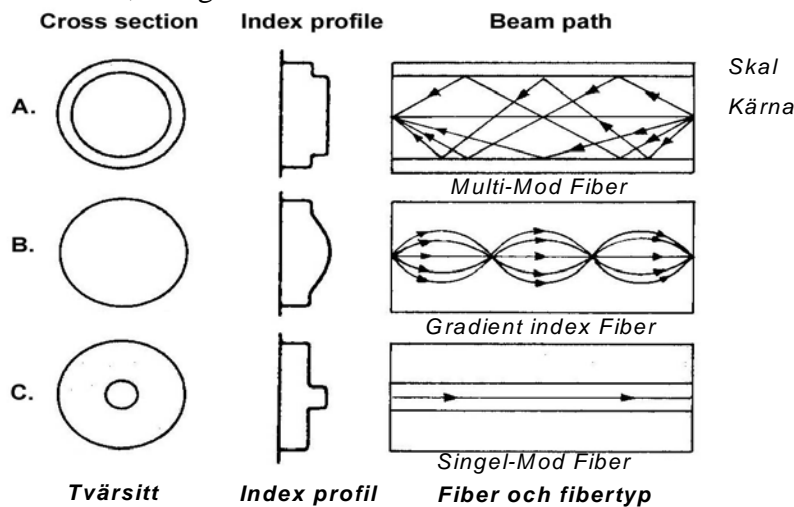
5.3 Fiberoptiska sensorer (FOS)

5.3.1 Allmänt

Utvecklingen av fiberoptiska sensorer startade efter att lasern uppfunnits. Under ett test med laserstrålar i luft fann forskarna att transmissionen av ljus i luft var högre om luften var disig och fuktig. En ide föddes att stänga in laserstrålen i glas men tekniken övergavs då det blev svårt och dyrt att placera linser så ljuset blev helt parallellt med glastuben som strålen skulle färdas igenom, Yeh (1990). Samtidigt bedrevs forskning av elektromagnetisk teori av microvågor i di-elektriska stavar. Tester med tunnare och tunnare glasrör skedde. På tio år lyckades man minska energibortfallet från 1000 db/km till mindre än 1 db/km. Ghatak och Thyagarajan (1998), samtidigt lärde sig andra forskare hur man sände information med hjälp av laser.

Nu öppnades möjligheter att sända digital information väldigt långt, väldigt snabbt utan energiförluster. Den första optiska fibern var född.

Optiska fibrer är ett icke elektriskt ledande medium, de är konstruerade för att transportera ljus över hela dess längd. Fiberns uppgift är att styra ljus längs med fibern som består av en cylindrisk kärna med reflexionsindex n_1 och ett skall med reflexionsindex n_2 , där $n_2 < n_1$ vilket gör att ljuset studsar på väggen mellan kärna och skalet, se figur 5.7.



Figur 5.7 Optiska fibrer, Jönsson (1995)

Det finns tre typer av optiska fibrer. Singelmodfibern(SMF), som är den vanligaste fibern i kommunikationssystem, Ghatak och Thyagarajan (1998). SMF bär endast en mod av ljusvågor, den sk. grundmoden. Storleken på fibern minskar tills endast den grundmoden återstår, se figur 5.7. Fibern har hög bandbredd men den är skör och knäcks lätt under installation, Jönsson (1995). Det är också svårt att sammanfoga två ändar av SMF (sammanfogning benämns splicing), Yeh (1990). Fibrer som bär fler moder av ljusvågor kallas multi mod fibrer, MMF. Hos gradientindex fibrer minskar reflexionsindex gradvis från kärnan till skalet vilket gör att ljusstrålarna böjs mer och mer ju längre ut från kärnan de kommer.

5.3.2 Teori bakom fiberoptisk mätning

Detta avsnitt presenterar kortfattat teorin bakom fiberoptisk mätning, bara principerna beskrivs då detta är gemensamt för samtliga fiberoptiska system. Hur våglängder, refraktion, ljusintensitet och mätdata tolkas och används skiljer sig från system till system och behandlas inte i denna rapport. Refraktionsindex (n) är ett optiskt kännetecken för transparenta material. Refraktionsindex definieras som förhållandet mellan ljusets hastighet i vakuum i förhållande till ljusets hastighet i det transparenta materialet enligt:

$$n = \frac{c_{vac}}{c_{mat}} \quad (5:1)$$

Ljuset färdas alltid långsammare i det transparenta materialet än i vakuum vilket innebär att refraktionsindex alltid är större än 1.0. Även om ljus alltid färdas i rät vinkel i det optiska materialet händer det något vid ytan. Ljuset böjs när det passerar genom en yta där refraktionsindexet ändras, t ex när det får från luft till glas. Storleken på denna vinkeländring beror på refraktionsindex mellan de två medierna och den vinkel som ljuset möter ytan med. Infallsvinkeln och refraktionen mäts mot en linje vinkelrät mot ytan, sambandet är känt som Snell's lag och kan skrivas:

$$n_i \sin I = n_r \sin R \quad (5:2)$$

där n_i och n_r är refraktionsindex av det ursprungliga mediet och mediet till vilket ljuset bryts. I och R är infallsvinkeln samt brytningsvinkel.

Förenklat kan transporten av ljus i en optisk fiber förklaras med att när ljuset färdas från fiberkärnan som har ett högt refraktionsindex till skyddshöljet med ett lägre index reflekteras allt ljus tillbaka till kärnan. I de fall när n_1 och n_2 är lika stora inom sitt tvärsnitt benämns den optiska fibern stegindexfiber (SI) och om n_1 varierar inom kärnan benämns den optiska fibern gradientindexfiber (GI)

I likhet med andra överföringsmedium så uppstår det effekt- och spridningsförluster när ljuset färdas längs den optiska fibern. Dessa förluster är dock oftast förknippade med vissa våglängder, eller om man vänder på det för en visst våglängdsband kan förlusterna bli mycket små.

Storleken på kärna och höljet kan variera inom relativt stora gränser beroende på typ av fiber och behov, Hecht, (1998). En optisk fiber kan bär en eller flera moder, detta beror på diametern av fibern och refraktionsindex, om kärnan är liten $< ca 10 \text{ mm}$, är fibern en enkelmodsfiber (SMF) och om kärnan är stor $> 10 \text{ mm}$ benämns fiber multimodsfiber (MMF), Ansari et. al., (1997)

5.3.3 Material för optiska fiber

De fundamentala kraven för att tillverka optiska fibrer kan till synes verka enkelt. Man behöver ett material som är transparent och som kan dras ut till långa tunna fibrer med en tydlig kontaktyta mellan kärnan och höljet som är enhetligt längs hela fiberns längd och vill motstå den miljö den ska användas i. De flesta fibrer tillverkas av glas av mycket hög renhet, med någon grad av förorening för att anpassas till korrekt refraktionsindex. Över åren har glas baserat på kisel och även plastmaterial visat sig vara de bästa materialen för optiska fibrer. Glas är det mest använda men optiska fibrer tillverkade av plast är lättare och billigare, mer flexibla och enklare att hantera, dock har plast betydligt högre förluster än glas.

Kiselbaserade optiska fibrer har förluster ner till ca 5 dB/km medan fibrer av plast upp till ca 50 dB/m.

En standardiserad optisk fiber av plast har en kärna av polymetylmetakrylat och ett hölje av en polymer med lägre refraktionsindex. En optisk fiber av glas är normalt tillverkad av kvarts (SiO_2) med tillsats av germaniumdioxid (GeO_2) för att kärnan skall få ett högre refraktionsindex. Normalt skyddas kärnan med ett plasthölje, Ansari et. al., (1997).

Utanför kärnan och höljet finns en yttre beläggning för skydd mot spröda brott. Vanliga material för skyddshöljet är olika typer av polymerer, silikoner eller akryliska material.

5.3.4 *Livslängd*

För bygg- och anläggningskonstruktioner kommer en fiberoptisk kabel att förutom mekanisk töjning utsättas för externa påfrestningar som hög och låg temperatur, fuktighet och kemisk påverkan. En typisk konstruktion har vid byggande en förväntad livslängd av ca 50 – 150 år. Optiska fiber har inte funnits så länge och normalt förlitar man sig på accelererande åldringsförsök. För att kunna göra en fullständig bedömning måste man ta hänsyn till den miljö där fibern skall användas. Försök har påvisat att refraktionsindex hos en optisk fiber påverkas minimalt upp till temperaturer av ca 300° C och accelererande åldringsförsök har visat att man kan förvänta sig livslängder upp till ca 50 år om brukartemperaturen är under 80° C, Kalamkarov et. al., (2000). Detta betyder att optiska fiber och sensorer har en betydligt längre livslängd än de normalt traditionella mätsystemen.

5.3.5 *Sensorer*

Fysiska effekter påverkar egenskaperna av det ljuset och ljusvågorna i en optisk fiber. t.ex. en förändring i temperatur hos fibern motsvarar en motsvarande förändring av våglängden hos det reflekterande ljuset i fibern. Fiberoptiska sensorer (FOS) används i många mätapplikationer men de vanligaste typerna är hydrofoner, temperatur-, tryck- och töjningsmätning. Andra lyckade uppfinningar med fiberoptik är det fiberoptiska gyroskopet (FOG) och olika typer av kemiska och biomedicinska sensorer som inte behandlas här.

Från 1983 finns ett antal internationella konferenser som enbart behandlar FOS, tex ”Fibre Sensors Conference” OFS-17 (2005) och ”International Conference on Experimental Mechanics” ICEM (2004)

I jämförelse med traditionella sensorer har FOS följande fördelar, Ansari (1997) och Leung (2001):

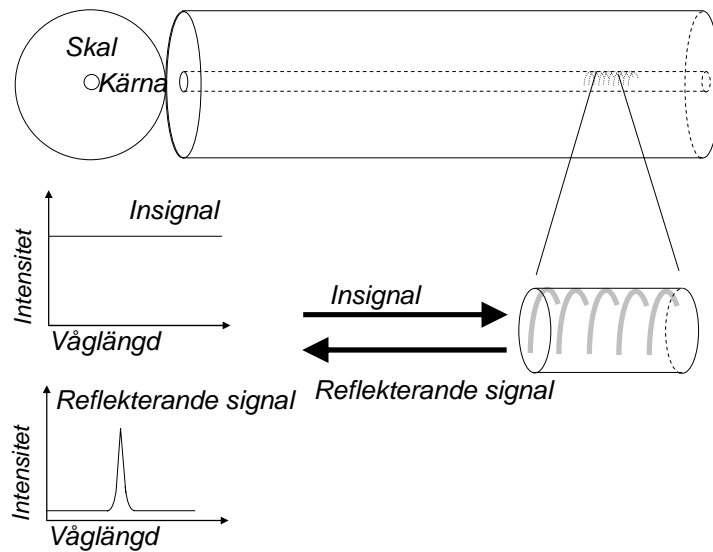
- Geometrisk formbara
- Hög känslighet och stor bandvidd
- Små
- Immuna mot elektrisk och elektromagnetiska störningar
- Kan användas som sensor och signalväg
- Enkla att integrera i andra material p.g.a. dimensioner och materialegenskaper
- Mindre brus
- Högre stabilitet

De två sista punkterna är enligt Ansari(1997), de viktigaste egenskaperna som gör FOS till en användbar sensor för CSHM. Största nackdelen med konventionella FOS är, enligt Leung (2001), att de är punktsensorer eller lokala sensorer. Lokala sensorer kan ge användbar information om en konstruktions tillstånd eller för korrelering av antaganden för modeller. För CSHM är de dock bara användbara om de kritiska områdena där mätning ger mest information är välkända. Vid t ex en mätning av tillståndet på en betongkonstruktion måste sensorerna ge information om både placering och storlek på eventuella sprickor samt om de propagerar. Antalet sensorer måste täcka in hela konstruktionen eller så måste en annan typ av sensor användas. Vid mätning på stora konstruktioner är det därför nödvändigt att sprida sensorer som kan observera skador oavsett var de uppkommer, Leung (2001).

Fiber Bragg Gitter, Fibre Bragg Grating (FBG)

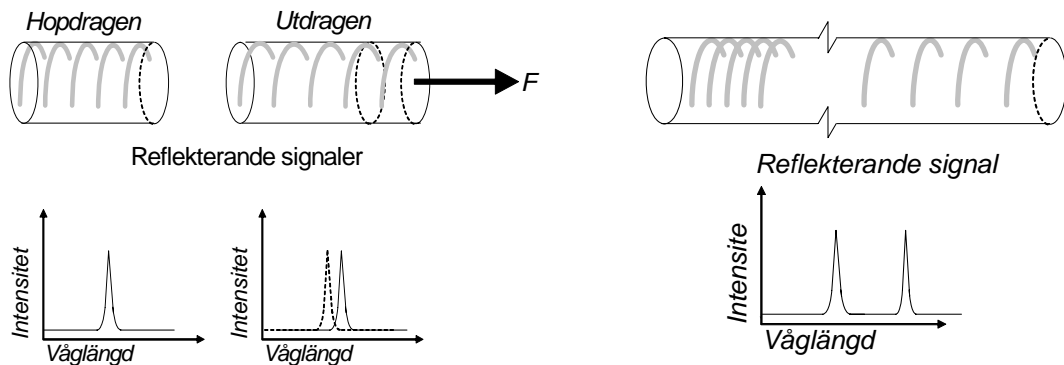
Den vanligaste, enklaste och kanske mest använda fiber optiska sensorn inom bygg och anläggningstillämpningar är den så kallade Bragg grating (sv. gitter) sensorn, Utsi (2001). Små gitter ristats in på fibern, oftast med UV ljus. Man kan skapa olika periodiska avstånd mellan risporna sk gitter. Avståndet mellan risporna ger olika våglängd på den reflekterande signalen enligt figur 5.8. Detta gör att flera sensorer kan appliceras på samma fiber, > 100. Detta benämns också multiplexing. Antalet sensorer och upplösningen är starkt sammanknipat, ju fler sensorer desto mer begränsas mätområdet. Vid ca 5 sensorer kan man mäta upp till 10 000 μ s per sensor – detta är också av görande på det system som används.

I de fall ett bredbandsljus skickas in i fibern med dessa gitter, kommer ett smalt område av ljuset (en specifik våglängd) att reflekteras när det träffar på gittret medan alla andra våglängder kommer att passera obehindrat.



Figur 5.8 Fiber Bragg Grating (gitter) sensor

Sensorerna används för att mäta temperatur och töjning. En känd ändring i våglängd motsvarar en viss töjning eller temperaturförändring. Figur 5.9 visar en FBG sensor. Då förändringen i våglängd orsakade av töjning är mindre än skillnaden i våglängd orsakad av skillnaden i avstånd mellan risporna kan man analysera varje sensor för sig. I tabell 5.7 redovisas typiska prestanda för Bragg gratings sensorer.



Figur 5.9a) Töjning ger våglängdsförändring

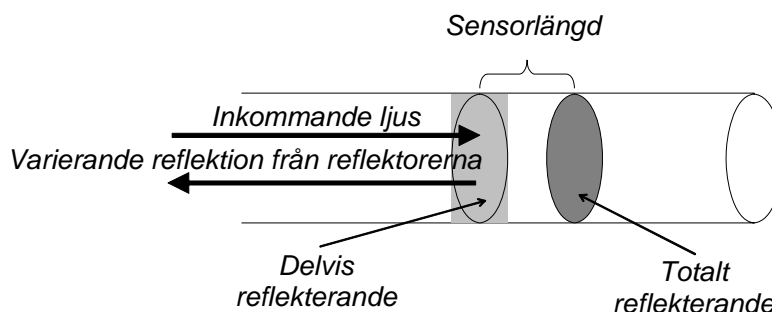
Figur 5.9b) Olika avstånd mellan risporna ger olika våglängdsreflektioner

Tabell 5.7 Prestanda för Bragg gratings sensorer

Prestanda	Karaktäristik
<i>Mätområde</i>	<i>Normalt ca 1 μs upp till ca 50 000 μs</i>
<i>Frekvensområde</i>	<i>Upp till nivån kHz, normalt upp till ca 200 Hz</i>
<i>Temperaturområde</i>	<i>Användbara i spannet ca -40 °C - + 100 °C</i>
<i>Mätavvikelse</i>	<i>0.01 – 0.05 % beroende på system</i>
<i>Storlek och vikt</i>	<i>Låg vikt, beror på fiberns längd och skyddshölje</i>
<i>Långtidsegenskaper</i>	<i>Lämpliga för långtidsmätningar > 25 år (beräknat)</i>
<i>Kostnad</i>	<i>Sensorer från ca 100 kr, grundinvestering hög i utrustning.</i>

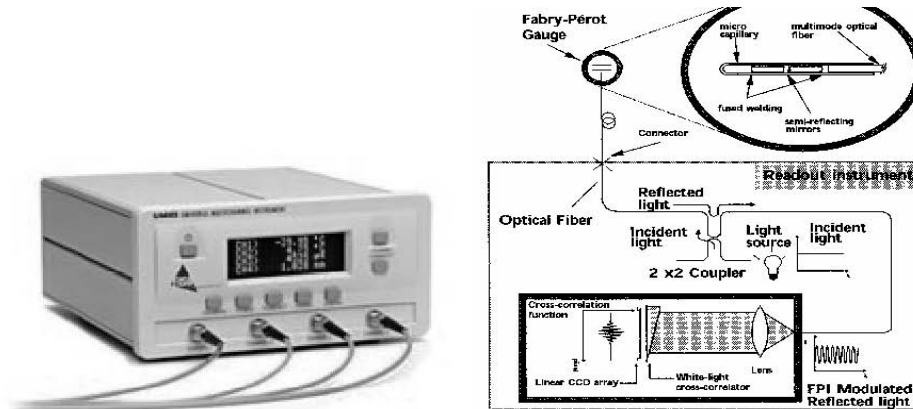
Fabry-Perot sensorer

En Fabry-Perot sensor är en typ av fiberoptisk töjningsgivare som förenklat baseras på interferomtrimätning av förändring i längd av en luftspalt placerad mellan två reflektorer inom ett hårrör. Luftspaltsavståndet är också sensorens längd, se figur 5.10. Den första reflektorn reflekterar delvis och den andra är en totalreflektor. Vid töjning ökar avståndet mellan reflektorerna och luftspalten blir större. Töjning och temperatur beräknas från fasförskjutning av det reflekterande ljuset. Endast en sensor per fiber kan appliceras. I tabell 5.8 visas typiska prestanda för en Fabry-Perot sensor.



Figur 5.10 Fabry-Perot sensor

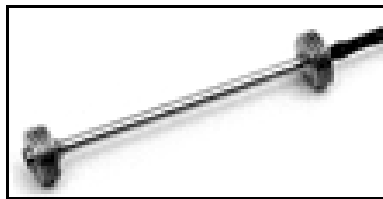
I figur 5.11 visas ett typiskt Fabry-Perot system, se också Bosch och Lecture (1995) och Jarvis, (1983) och i figur 5.12 visas ett exempel på en Fabry-Perot sensor.



Figur 5.11 Fabry-Perot system, from Sustainable Bridges, (2004).

Tabell 5.8 Prestanda för Fabry Perot sensorer

Prestanda	Karaktäristik
Mätområde	Normalt ca 1 μs upp till ca 10 000 μs
Frekvensområde	20 Hz – 200 kHz
Temperaturområde	Användbara i spannet ca -40 °C - + 100 °C
Mätavvikelse	0.01 – 0.025 %, beroende på system
Storlek och vikt	< 100 gram
Långtidsegenskaper	Lämpliga för långtidsmätningar > 25 år (beräknat)
Kostnad	Sensorer från ca 5 000 kr



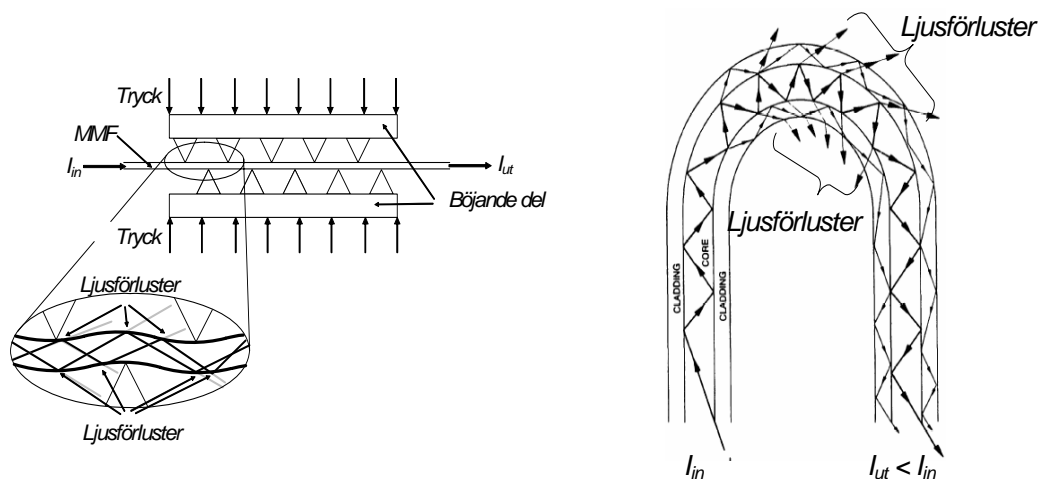
Figur 5.12 Fabry-Perot sensor för t ex injutting i betong

En nackdel med Fabry-Perot sensorn är att multiplexing inte kan tillämpas, dock försöker man komma runt detta problem med hjälp av fiberoptiska omkopplare dock behövs fortfarande en fiberoptisk kabel per sensor.

Mikroböjande sensorer

Microböjande sensorer bygger på det faktum att ju mer en multi-mod fiber, MMF, är krökt ju mer ljus läcker ut då reflektionen för MMF aldrig är 100%. Det läckande ljuset beror på ljusstrålens infallsvinkel. Böjs fibern ökar infallsvinkeln och mer ljus läcker varvid detta mäts, se figur 5.11. En typisk tillämpning på mikroböjande sensorer är tryckmätning. Rippert et. al. (2000). I figur 5.11a) visas en fiber som är placerad mellan två tandformade block fäst på konstruktionen man önskar mäta på, när dessa plattor dras isär, eller pressas ihop, så minskar eller ökar ljusintensiteten.

Känsligheten är så hög att även svaga ljusvågor är tillräckligt för att detekteras, Yeh (1990). För appliceringar i CSHM är temperaturkompenseringen, drift och icke-linjärt förhållande mellan ljusförluster och böjning orsaker som kan ge problem, framför allt för långtidsmätningar, Inaudi (2003).



Figur 5.11a) Mikroböjande sensorer, från Rippert et. al. (2000)

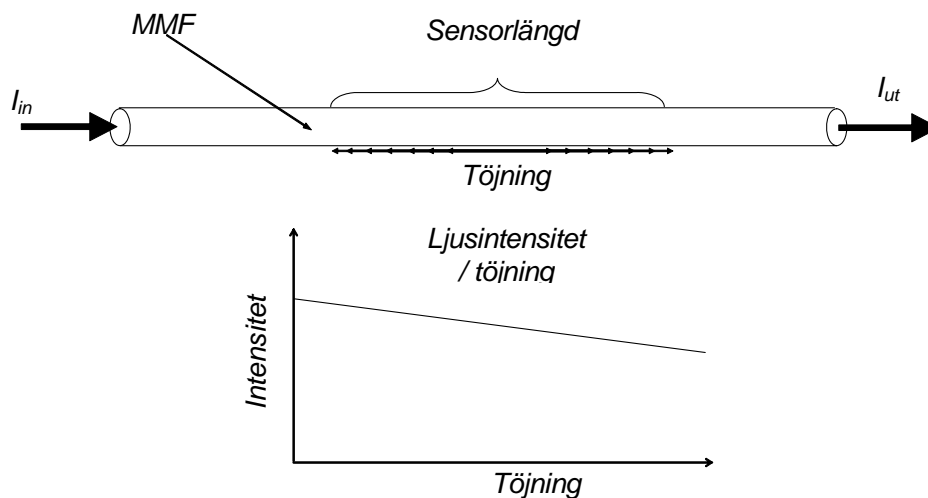
Figur 5.11b) Mikroböjande sensorer, från Ansari (1997)

Tabell 5.9 Prestanda för Mikroböjande sensorer

Prestanda	Karaktäristik
Mätområde	Normalt ca 1 μs upp till ca 10 000 μs
Frekvensområde	Upp till ca 100 Hz
Temperaturområde	Användbara i spannet ca -20 °C - + 60 °C
Mätavvikelse	Några få μs upp till längder av ca 10 m
Storlek och vikt	Hela sensorn med skydd etc upp till ca 400 g
Långtidsegenskaper	Mest lämpad för korttidsmätning
Kostnad	Sensorer från ca 1 000 kr

Sensorer baserade på intensitets eller amplitudminskningar

Denna typ av sensor, se figur 5.12, är en MMF som använder hela sin längd som mätområde. De baseras på faktumet att ljusförlusterna är större ju längre och tjockare en fiber är och att reflektionsindexet, n , ändras vid temperaturförändringar och deformation av fibern. Töjningen på fibern kan sedan beräknas från ljusförluster och förluster i amplitud hos ljusvågen, Utsi (2000) och Ansari (1997).



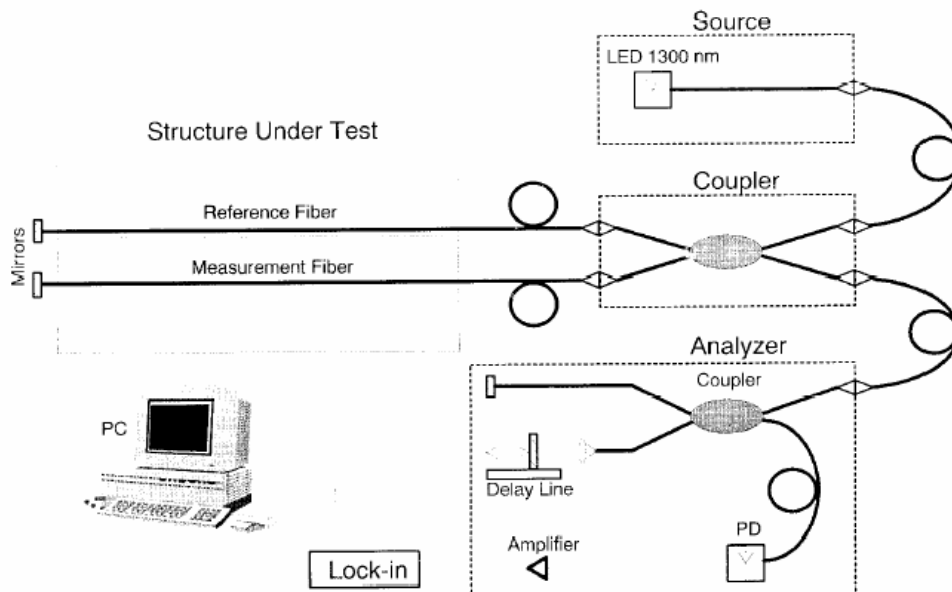
Figur 5.12 Ljusintensitetsförlustsensor, från Ansari (1997)

Brillouinspridningssensorer

Ansari (2002) och Bao et. al. (1995) refererar till Brillouin spridning som spridning av en ljusvåg orsakad av en akustisk våg, vibration. När en optiskt fiber utsätts för dessa vibrationer mäts det reflekterande ljuset. Förändringar och spridningar av frekvensen hos det reflekterande ljuset mäts och från detta kan töjningar beräknas. I Bao et. al. (1994) presenteras en sensor med en noggrannhet på 20 μ str där töjningen kunde lokaliseras inom en sträcka 5 meter. Den totala längden på denna sensor var 22 km. En ännu längre sensor presenteras av Lecoeuche et. al. (1999). Deras sensor var 25 km och de lyckades lokalisera töjning inom 2 meter. Denna typ av sensor används som brandlarm och till skadevarningssystem för stora konstruktioner som dammar och broar. Johnson et. al. (2004) visar hur flera typer av sensorer bl.a. brillouinspridningssensorer kan användas som en smart "svart låda" för demonstration av möjligheterna med utbredda sensorer som skadelokalisering och identifiering.

SOFO systemet

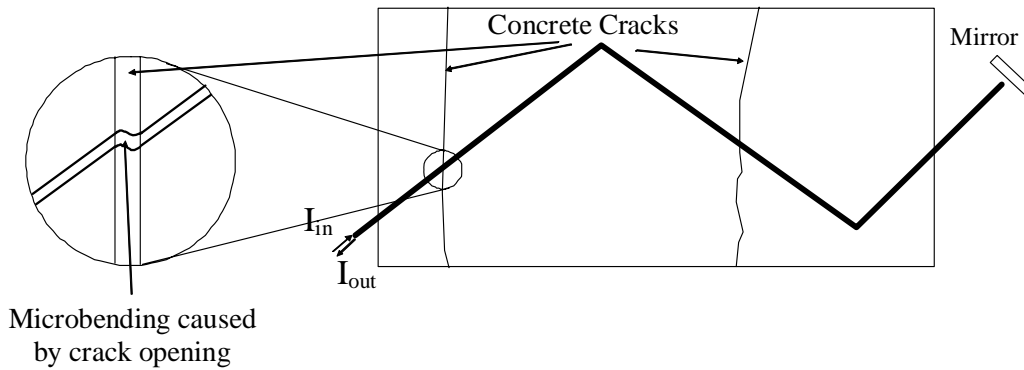
SOFO systemet är en kommersiell sensor utvecklad i Schweiz av EPFL och SMARTEC. Sensorsystemet har använts vid en mängd CSHM applikationervärlden över. Mer än hundratalet projekt inkluderat broar, tunnlar, pelar, stödmurar, dammar, historiska monument, kärnkraftverk och laborationsobjekt har utrustats med sensorer av denna typ. SOFO-sensorn består av två fibrer fixerade i en metalltub som kan bäddas in i betongkonstruktioner eller fästas externt. Den ena fibern, mätfibern, är förspänd och den andra är en referensfiber som inte töjer sig även om tuben töjer sig. Denna fiber används vid temperaturkompensering. Tubens deformation är densamma som deformationen av den förspända fibern och detekteras genom att mäta ljusets fasförskjutning av de reflekterande ljusvågorna i de två fibrerna, se figur 5.13, Leung (2001) och Inaudi et. al. (1994)



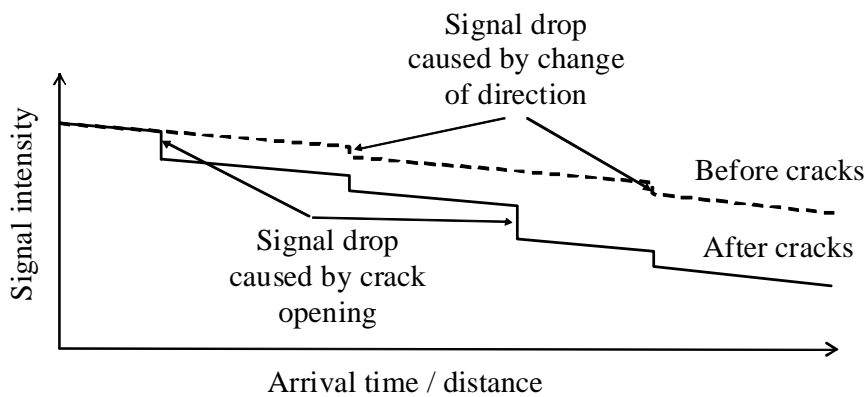
Figur 5.13 Schematisk bild av SOFO-sensorn, Inaudi et. al. (1994)

Sensorer för sprickdetektering och spricklokalisering

I Leung (2001) presenteras en ny typ av optisk sensor där tekniken med mikroböjande fibrer används. Iden är att täcka en betongyta med en MMF i ett sicksack mönster. Orsaken är att fibern inte får passera väntade eller redan uppkomna sprickor vinkelrätt, eftersom systemet bygger på att en spricka i betongkonstruktionen måste ge en böjning i fibern enligt figur 5.14. Lokaliseringen av en spricka räknas ut från tiden det tar att reflektera signalen, se figur 5.15. Systemet är under utveckling, men har provats på ett par konstruktioner med lovande resultat, Leung (2001).



Figur 5.14 Sensor för detektering och lokalisering av betongsprickor



Figur 5.15 Intensitetet på signalen för och efter uppsprickning.

5.3.6 Hantering och installation av fiberoptiska system

Med hänsyn till den stora variationen av fiberoptiska system och den miljö som fiberoptiska sensorer används i går det inte att ge rekommendationer för installation av sensorer och tillhörande mätsystem som passar in på samtliga. Utan man måste i första hand använda sig av de rekommendationer som leverantören ger. Det finns dock ett antal generella krav som bör uppfyllas för att man skall erhålla ett så robust och långlivat system som möjligt.

Först gäller det installationen av själva sensorn i eller på basmaterialet (konstruktionen). Det är viktigt att en fullvärdig kontakt skapas mellan sensor och konstruktion, men fibern måste samtidigt vara skyddad mot yttre påverkan utan att mätresultat och noggrannhet försämras. Olika system löser detta på olika sätt, t ex kan man för Bragg gratings integrera fibern i förslagsvis ett kompositmaterial som

sedan gjuts in eller limmas mot konstruktion. Varje insats måste dock kalibreras för att minimera mätfel.

I vissa fall kan man även tillåta sig att limma själva fibersensorn direkt mot konstruktionen. Dock måste den skyddas noggrant efteråt och system som tillämpar denna teknik kan inte förväntas ha lika lång livslängd som integrerade fibrer.

Vid montering av fiberoptiska sensorer är det viktigt att fibern hanteras varsamt så att den inte bryts av – här har normalt leverantörerna krav på hur mycket fibern får böjas. Vidare så är fibern försedd med en koppling för kontakt till ljus och registreringsutrustning. Normalt utför man endast periodisk mätning varför dessa kontakter måste skyddas mot fukt och föroreningar när de inte är inkopplade.

De viktigaste i hela installationsarbetet är dock en noggrann och detaljerad planering och skapa en arbetsplats som underlättar arbetet. Innan installationen genomförs skall man veta var givarna ska sitta, var man har tillgång till elektricitet och praktiska saker som värme och ljus. Mätssystemet skall i stort vara klart med sensorer och rätt längd på kablar etc. innan man kommer till arbetsplatsen så att man kan koncentrera sig på själva monteringen och efterföljande registrering. Man ska också innan bestämma om givarna skall monteras i konstruktionen eller på ytan samt hur länge man avser att ha systemet i drift och hur ofta man vill följa upp mätningarna. En del av denna problematik behandlas i tidigare kapitel i rapporten men specifikt för fiberoptiska system är att man kan planera över lång tid med tanke på den relativt långa livslängden hos systemen.

6 ANVÄNDNINGSSOMRÅDEN FÖR FOS

6.1 Allmänt

Det var inte förrän under senare delen av 1980-talet som forskare inom byggnadsdisciplinen påbörjade experimentera med iden att använda fiberoptiska sensorer i kombination med byggnadsmaterial- och konstruktioner.

En fiberoptisk sensor utvecklades 1988 för att bestämma luftinnehållet i färsk betong. Sensorn baserades på intensiteten av det reflekterade ljuset i glasfibers spets som var i direktkontakt med den färska betongen. När fiberspetsen rör sig genom den färska betongen kommer den i direktkontakt med beståndsdelarna i betongen, ballast, pasta vatten och luft. På grund av den stora skillnaden i refraktionsindex mellan fibern ($n=1.46$) och luftbubblorna ($n=1$) vid gränssytan mellan fiber och luft, kommer den största delen av ljuset att reflekteras tillbaka in i fibern. Den kinematiska energin av den relativa rörelsen mellan sensorns spets och de ingående material ger upphov till ett refraktionsmönster indikativt motsvarande procentandelar luft i betong Ansari et. al., (1997).

6.2 Töjningsmätning

Töjningsmätning med optiska fiber har tidigare berörts i rapporten och det finns ett flertal olika system för detta t ex Bragg sensorer, Mikroböjnings sensorer och Fabry-Perot sensorer, men även fler, Pomarico et. al. (1997). Ett exempel av töjningsmätning med fiberoptiska sensorer för anläggningskonstruktioner är mätning av töjning i kablar hos hängbroar (Schulz et. al., 1998). Andra exempel är användningen av optiska sensorer i tunnlar och stödmursförankringar. Töjningsmätning är idag den vanligaste tillämpningen med optiska sensorer och tillämpningarna under de sista åren har ökat exponentiellt, inte bara för broar och andra anläggningskonstruktioner utan också för byggnader och områden där tidigare töjningsgivare är vanligt använda.

6.3 Temperaturmätning

Fiberoptiska temperatursensorer är troligen den största kommersiella tillämpningen. Många olika fysikaliska samband används för att genomföra mätning och ingen ensam fiberoptisk teknik lämpar sig för samtliga temperatur- och användningsområden med tillhörande nödvändig uppläsning. Mätområdet är mycket stort med rapporterade mätvärden från -50 °C till över 1000 °C . Noggrannheten kan vara i storleksordningen $\pm 0.1\text{ °C}$, (Keck, 1996). Bland annat demonstrerade och uppvisade Wang et. al. (1994) optisk fiber tillverkad av safir med användningstemperatur i området kring 1000 °C .

6.4 Detektering av klorider

Forskning har pågått för att ta fram fiberoptiska sensorer för att känna av klorider i hårdnad betong, Fuhr et. a.l., (1998). Icke-förstörande mätning av olika betongparametrar har visat sig vara svårt. I fallet med klorider innebär nuvarande metoder att man borrar hål i betongen och därefter utför traditionell kemisk provtagning. Det fiberoptiska systemet är baserat på analytisk kemi och modulering av den optiska signalen vilken transporteras till/från mätområdet via en optisk kabel. Fibern är integrerad med konstruktionen. Bestämning av nivån på kloridjonerna baseras på fiberns placering samt intensiteten på ljuset och våglängdens variation av insignalen.

En inbäddad fiberoptisk kloridsensor är utformad genom användning av ett spektroskopiskt mätförfarande där en sk ”dubbelfiber” används med en metodik kopplad till kloridanalys. Resultatet är en fiberoptisk sensor som mäter kloridkoncentrationen. Sensorn baseras på att en optisk absorption av en insignal genom en silvernitratlösning. Sensorhuvudet består av en mindre kammare i vilken en indikatorlösning är placerad, i fronten eller på toppen är ett genomsläppligt membran placerat. När sensorn förs genom en fuktig miljö som innehåller klorider skapas en bindning mellan kloridjoner och silverjoner, reaktionen skapar silverklorid. Det finns från början ett känt överflöd av positiva silverjoner, vilka adsorberas på ytan av silverkloridmolekylen som då blir positivt laddad. Allteftersom fler klorider passerar genom membranet kommer kloridjonerna till slut att överstiga antalen silverjoner. Kloridjonerna adsorberas på ytan av silverkloridmolekylen vilket slutligen resulterar i en negativ laddning med repellering av indikatorsubstanten. Utfällningen skiftar då från rosa till mjölkvitt, skiftningen indikerar att koncentrationen av klorider överstiger koncentrationen av silver, vilket från början var känt och kloridinnehållet kan således bestämmas. Tekniken befinner sig fortfarande på forskningsstadiet, men visar på det stora tillämpningsområdet som finns för fiberoptiska sensorer av olika typ.

6.5 Sprickdetektering

En betydelsefull parameter för att bestämma brottmekaniska egenskaper är öppningen i sprickspetsen sk CTOD (Crack Tip Opening Displacement). Detta har framtill idag varit mer eller mindre experimentellt omöjligt att mäta med stor noggrannhet. Ett forskningsprogram där en inbäddad fiberoptisk CTOD sensor används för detta ändamål har presenterats. I försöket användes små betongbalkar med en väl definierad sprickspets belastade i trepunkts-böjförsök. Detaljer om sensorn framgår inte i undersökningen men resultatet visar att öppningen i sprickspetsen var betydligt mindre än vad som framkommit med tidigare mättekniker, (Lee et. al., 1997).

Det finns också väldigt enkla spricksensorer tillgängliga. Ett exempel är en fiberoptisk sensor integrerad i konstruktion. Så länge materialet är intakt överför fibern ljus utan svårighet och med små förluster. En spricka bryter av fiber och reducerar intensiteten eller avbryter ljusutbytet totalt, beroende på hur stor sprickan är – helt enkelt en av och på sensor. Sensorn kan placeras på ett kritiskt djup så om fibern bryts av måste man företa en inspektion och kartlägga orsaken till problemet, (Andersson, 1993).

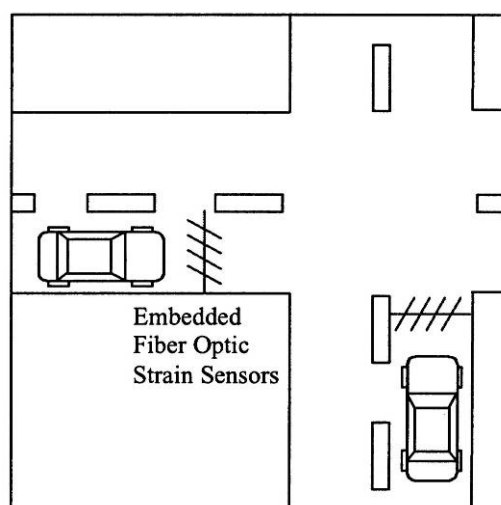
6.6 Integrerade optiska sensorer

Den fördelaktiga storleken på en normal optisk fiber gör dem väldigt lämpliga att integrera i olika material, t ex i fiberkompositer sk FRP (Fibre Reinforced Polymers). I samband med förstärkning av betongkonstruktioner med FRP laminat och vävar är det förhållandevis enkelt att placera en fiber längs förstärkningen. Det är därefter möjligt att följa upp såväl korttids – som långtidseffekter av förstärkningen. När förtillverkade kompositer används kan fibern placeras i kompositen i samband med tillverkningen, (Kalamkarov et. al., 2000). Detta kan ge smarta förstärkningsmaterial som gör det möjligt att följa upp förstärkningen samt konstruktionens beteende över lång tid. I jämförelse med traditionella töjningsgivare räknas med en betydligt längre livslängd för dessa typer av sensorer – upp till 25 år diskuteras – dock saknas långtidsförsök som stärker detta påstående – klart är dock att livslängden överstiger töjningsgivarnas.

I Tyskland har man utvecklat fiberoptiska sensorer för att mäta krafter från förspänning samt sprickutveckling. Tekniken har tillämpats på en bro, Schiessbergstrasse bro. Bron har tre spann med en spannlängd av 53,0 meter. Bron var bl a armerad med 27 partiellt förspända glasfiberkablar. För att registrera spännkraften integrerades fiberoptiska kablar och sensorer i ett antal av kablarna. I tillägg monterades fiber optiska sensorer på över och undersidan av brodäcket – på den dragna sidan – i ett antal sektioner. Mätningen på bron fortgår och data länkas till en mätcentral via det traditionella telekommunikationsnätet. Resultat från mätningen visar bl a att spännkraften i glasfiberkablarna varit för hög, vilket resulterat i fiberbrott. Orsaken är spänningsrelaxation och resultaten har bl a lett fram till en begränsning i uppspänningskraft motsvarande ca 25 % av glasfiberkompositens brottöjning, (Ansari et. al., 1997), (Dill & Curtis, 1993) och (Wolff. & Miesslerer, 1992).

6.7 Trafikövervakning

Ytterligare ett område relaterat till anläggningskonstruktioner i samband med mätning och övervakning av trafiken. Eftersom fibrerna är små och anpassningsbara samt motståndskraftiga mot korrosion kan de vara utomordentligt lämpliga för att integreras i t ex körbanor och även tillföra fler funktioner än traditionella system, t ex trafikövervakning och kontroll, Schulz et. al., (1998), se också figur 6.1.



Figur 6.1 System för kontroll av trafikflöde baserat på optiska fiber sensorer

7 TILLSTÅNDSBEDÖMNINGAR OCH UPPGRADERING AV TRE BETONGBROAR.

7.1 Bakgrund

I följande kapitel beskrivs mätningar, tillståndsbedömningar och uppgradering av prestanda hos tre olika broar. Med andra ord hur man applicerar CSHM i verkliga fall. De två första broarna, Kalkällebron och Luossajokkbron är inom projektet Malmbanan 30 ton, där axellasten på järnvägen mellan Narvik och Luleå uppgraderades från 25 till 30 ton. Det tredje exemplet beskriver mätningar av sprickor på Gröndalsbron i samband med förstärkningen av denna.

Kalkällebron i Luleå bedömdes ha för låg momentkapacitet i trågets tvärriktning för ökad axellast och beslut om att förstärka bron med kolfiberväv togs. Då förstärkningsarbeten med kolfiber inte använts tidigare beslutades att en omfattande mätning skulle utföras för att säkerställa kvaliteten på arbetet. För projektet valdes en mätmetod med periodisk långtidsmätning med manuell trigging som utfördes i tre olika steg.

1. Mätning innan förstärkning
2. Mätning efter förstärkning
3. Mätning långt efter förstärkning

I den sista mätningen utfördes också analyser av trafikens dynamiska inverkan på konstruktionen.

Det andra exemplet behandlar Luossajokkbron i Kiruna, också den bedömdes ha för låg momentkapacitet och risk för att armeringsstålet i överkant stöd skulle överstiga flytgränsen förelåg. Då bronns resterande livslängd var begränsad till maximalt 10 år på grund av spårromdragning gjordes en grundläggande tillståndsbedömning och långtidsövervakning enligt följande steg:

1. Kalkylering enligt befintliga svenska järnvägsnormer
2. Mätning i kritiskt snitt
3. Förfinad probabilistisk beräkning baserad på mätningar av laster och material sk. FORM (First Order of Reliability Method).
4. Periodisk långtidsmätning (övervakning) med automatisk trigging.

I det tredje exemplet behandlas Gröndalsbron i Stockholm. Vid inspektioner av bron upptäcktes skjuvsprickor i livet på lådbron. Vid ytterligare inspektioner visade sig sprickorna propagera varvid trafiken stängdes för att senare öppnas men med minskad intensitet. Planering inför detta arbete genomfördes enligt följande steg:

TILLSTÅNDSBEDÖMNING GENOM MÄTNING ANPASSAD FÖR ANLÄGGNINGSKONSTRUKTIONER

1. Kontinuerliga inspektioner
2. Minskning av last (temporärt)
3. Förstärkning med kolfiberlaminat och förspända stålstag
4. Manuellt startade kontinuerliga korttidsmätningar.

I tabell 7.1 sammanfattas hur de tre exemplen är kopplade till CSHM med avseende på mätparametrar, sensorer, mätstrategi och kommunikation

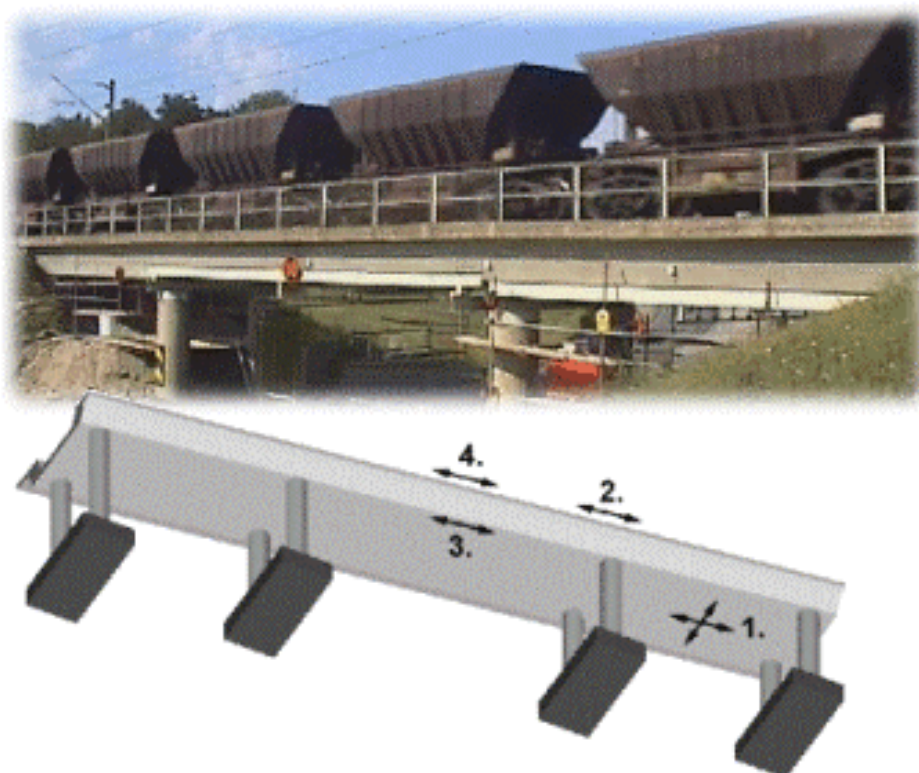
Tabell 7.1 Sammanfattning av CSHM tillämpningar på studerade broar

Mätobjekt	Mätparametrar	Sensorer	Mätstrategi	Kommunikation
Kalkällan	Töjning	Svetsade töjningsgivare	Periodisk	Mätningen skedde på plats.
	Deformation	LVDT	Manuell trigging	Data laddades direkt ner i mätlogger
	Hastighet	Lokinformation	Långtidsmätning	
	Laster	Lastinformation		
Luossajokk	Töjning	Svetsade töjningsgivare	Periodisk	GSM-modem för nedladdning av data till server.
	Deformation	LVDT, vinkelgivare	Automatisk trigging	
			Långtidsmätning	
Gröndal	Sprickvidder	Fiberoptiska töjningsgivare LVDT	Kontinuerlig (FOS och LVDT)	Mätningen skedde på plats.
			Korttidsmätning med manuell start för FOS	Data laddades direkt ner i mätlogger
			Långtidsmätning för LVDT	Data laddas ner kontinuerligt från LVTD-givarna med bredband

7.2 Kalkällebron i Luleå

Kalkällebron, se figur 7.1, förstärktes sommaren 1998 med 3200 meter kolfiber väv med en tjocklek på 0.17 mm. Orsaken till förstärkningen var i huvudsak att momentkapaciteten i tvärriktningen underskred momentet orsakat av den nya axellasten på 30 ton. Bron behövdes dock också förstärkas i längdriktningen, men förstärkningen i denna riktning var betydligt mer blygsam. Fördelen med väven var att man kunde variera fiberriktningen på väven i olika lager och på så sett maximera materialets utnyttjadegrad.

För att undersöka förstärkningseffekten utfördes ett omfattande mätprogram på bron före och efter förstärkningsarbetet. Både töjningar och deformationer mättes när malmtåg passerade bron i olika hastigheter. Samtliga tåg vägdes och tågens hastighet registrerades av lokföraren för att kunna jämföra mätvärden från de olika tågen med varandra.



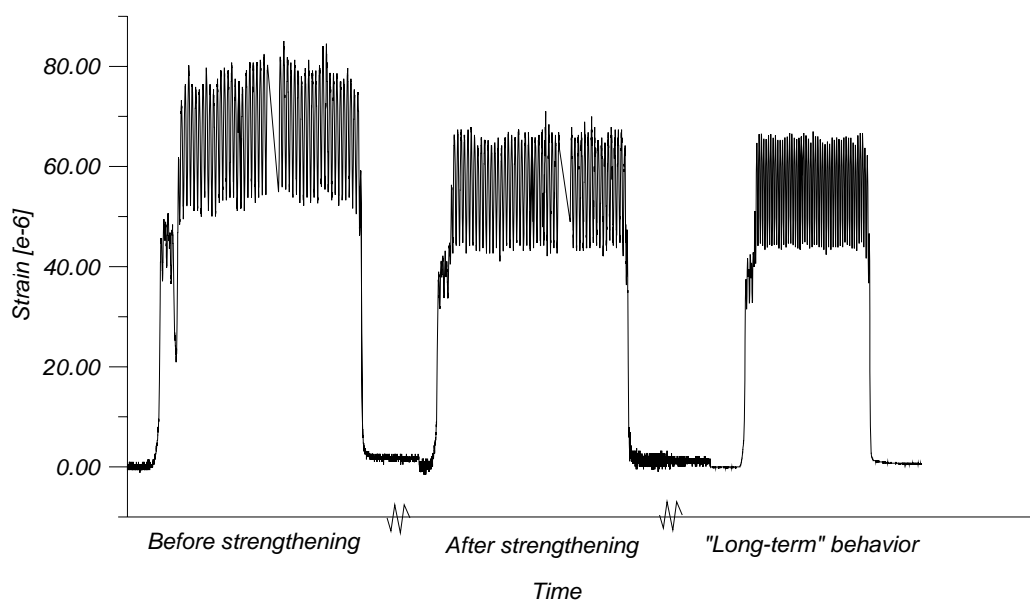
Figur 7.1 Kalkällebron med töjningsgivarnas placering.

Resultaten från mätningarna, både före, efter och långt efter förstärkningen visade att töjningen i stålarmeringen sjönk med samma förhållande som nedböjningen minskade. Detta tyder på att de svetsade töjningsgivarna är väl lämpade sensorer då de ger samma resultat som nedböjningsmätning som är en global mätmetod, Hejll (2002) och Hejll et. al. (2003).

Långtidsmätningen som avslutades fyra år efter installationen visar att kolfiberförstärkningen fungerar som beräknat, Täljsten och Carolin (2003), och detta visas schematiskt i figur 7.2. I resultatet kan man tydligt se hur töjningen i armeringen minskade med ~15 %. Intressant är också att långtidsresultaten väl överensstämmer med mätningen som gjordes direkt efter förstärkningen. Svetsade töjningsgivare fungerar alltså bra även vid långtidsmätningar. Ytterligare

information man kan utläsa från resultatet är att hastigheten på tåget ger väldigt liten skillnad på resultatet.

Detta resultat gjorde att ett examensarbete skrevs med ytterligare mätningar från Kalkällebron, Simonson (2002). Effekten av kolfiberförstärkningen, före, direkt efter, och två år efter förstärkningen gjordes. Tågens olika laster har normaliserats för att kunna jämföras.



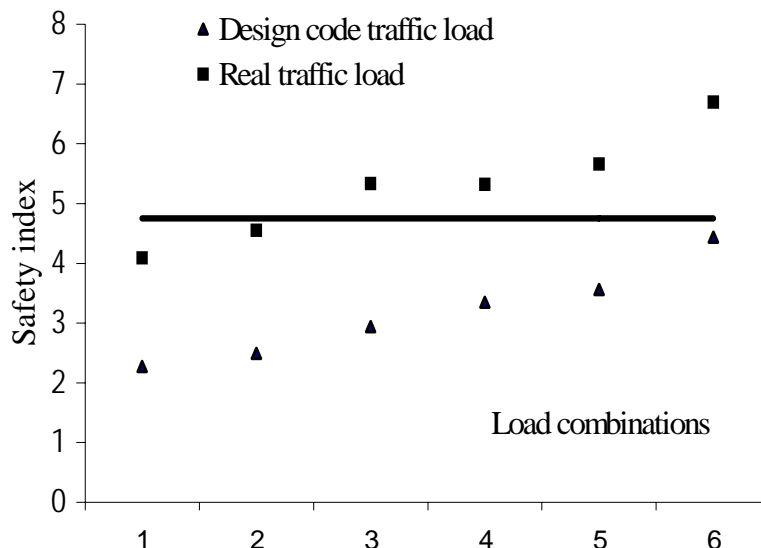
Figur 7.2 Effekten av kolfiberförstärkningen, före, direkt efter, och två år efter förstärkningen gjordes. Tågens olika laster har normaliserats för att kunna jämföras.

7.3 Luossajokkbron i Kiruna

Luossajokkbron i Kiruna är en av de 114 broar på Malmbanan som uppgraderades från 30 till 35 tons axellast. Den återstående livslängden på bron var väl definierad då spårmodragningar var förutspådda, Björnfot et. al. (2001). Största möjliga ansträngning gjordes därför för att säkerställa lastkapaciteten till minsta möjliga kostnad. Beräkningar baserade på normer visade att momentkapaciteten skulle överstigas. En preliminär mätning visade dock att töjningarna i stålet på det mest kritiska snittet var väl inom säkerhetsmarginalen, Danielsson et. al. (2002). Ytterligare töjningsmätningar och materialprover gjordes därför på bron. Material samlades för att kunna bedöma laster och material på en probabilistisk grund, FORM (First Order of Reliability Method) utfördes, Enochsson et. al. (2002). Resultatet visas i nedanstående diagram.



Figur 7.3. Luossajokkbron under last. IORE loket står placerat enligt värsta tänkbara scenario vilket ger maximala töjningar i det kritiska snittet. Simonsson (2002)



Figur 7.4 Resultat från FORM med olika säkerhetsindex i kombination med lastkombinationer, Enochsson et. al. (2002)

Det visade sig att det var möjligt att använda FORM för att beräkna säkerhetsindexet till en godkänd nivå beroende på vilka laster man kombinerade. För att kontrollera säkerheten ytterligare beslutades att bron skulle fortsätta övervakas med de befintliga sensorerna samt rotation med accelerometrar. För att kunna hämta data kontinuerligt installerades ett GSM-modem med vilket man kan dels styra dataloggern samt hämta mätdata utan att vara på plats.

7.4 Tvärbanebroarna i Stockholm

Under våren 2003 utfördes mätningar på Gröndal- och Alviksbron de s.k. tvärbanebroarna, med en för Sverige relativt okänd mätteknik, åtminstone för bygg- och anläggningskonstruktioner, nämligen genom användandet av fiberoptiska sensorer. Det som föranledde den aktuella mätningen var att båda lådbroarnas liv hade spruckit i flera snitt och sprickorna karakteriserades som skjvsprickor, König (2002). Broarna förstärktes först temporärt med utanpåliggande stålstag och därefter permanent med stag som efterspändes i hål borrade genom flänsarna och livet. Denna teknik användes i tvärsnitt som var mest uppspruckna. I tvärsnitt som hade högre dragpåkänningar än tillåtet, men med fina eller inga sprickor, användes pålimmade kolfiberlaminat för förstärkning. För att kartlägga effekter av kolfiberförstärkningen samt för att undersöka om sprickorna propagerade efter förstärkning togs beslut om mätning. Mätning har utförts såväl med traditionell teknik där LVDT (Linear Voltage Displacement Transducers) användes samt med teknik där FOS-givare (Fibre Optic Sensors) användes. Det var tyvärr inte möjligt att genomföra någon mätning innan förstärkning, vilket gör utvärderingen något bristfällig och medför att det endast går att undersöka om de existerande sprickorna propagerar under last samt vilken rörlig last som har störst inverkan på påkänningarna. På grund av en relativt begränsad budget för mätningen har det inte varit möjligt att genomföra en kontinuerlig mätning med FOS tekniken över en längre tid utan mätningen har varit periodisk fördelad på två tillfällen. En sommarmätning och en vintermätning. Därutöver framgår det att temperaturvariationen ger största påkänningen och överstiger påkänningen av spårvagnstrafiken med en faktor 10, Täljsten och Carolin (2003).

8 FRAMTIDA FORSKNING

Trots att utvecklingen inom CSHM har gått rasande fort de senaste tio åren inom området för anläggningskonstruktioner är behovet av utveckling stort. Kostnaden för sensorer, mätutrustning och kommunikationsutrustning sjunker stadigt, vilket troligen kommer att leda till att övervakning och tillståndsbedömningar genom mätning på konstruktioner blir allt mer vanligt förekommande. Kan man säkerställa och övervaka en konstruktions påkänningar över tiden är det möjligt att ytterligare optimera byggandet dessutom torde en övervakning av befintliga konstruktioner minska behovet av förstärkning Detta ger då också en större kostandseffektivitet i byggande och förvaltning. Den största potentialen finns inom underhålls och förstärkningsområdet där SHM kan ge ökade kunskaper om såväl laster som påkänningar för en konstruktion, därmed kan eventuella förstärkningar minimeras eller till och med helt uteslutas.

Idag är kunskapen gällande SHM relativt stor inom andra industrier, här borde samarbete kunna ge mycket värdefull kunskap för byggbranschen. Det är viktigt i framtiden att öka kunskapen om SHM inom byggområdet samt förstås inte vara rädd för att använda oss av den kunskap som finns inom andra branscher. Det är naturligt att vara skeptiskt inför ny teknik och nya tankesätt men med ett nytt sätt att tänka inom byggbranschen skulle anläggningar utrustade med SHM-teknik förenkla och spara resurser för ägare Inom CSHM pratar man om konstruktioner som själv skall påkalla underhåll och varna vid för höga påkänningar. I ett mer kortsiktigt perspektiv finns flera utvecklingsområden som är förhållandevis enkla att utföra. I denna rapport har vi försökt lyfta fram fördelar med SHM och sprida kunskap hur SHM kan appliceras på framförallt befintliga anläggningskonstruktioner. En av de viktigaste frågorna som tas upp i rapporten är att strukturera mätinsatserna. Tidigare har ofta insatserna skett för hastigt och ibland utan helhetstänkande eller tydlig struktur. En av de största fallgroparna man kan gå i vid en mätning eller övervakning är att för stor fokusering sker på själva mätningen och sensorerna och alldeles för lite resurser ges till hantering och utvärdering av data och uppföljning.

Globala mätmetoder för skadeidentifiering och lokalisering är under utveckling och bör få stort utrymme i utvecklingen framöver då det är ett svårt och stort kliv att få dessa metoder att fungera inte bara i laboratorier utan också på anläggningskonstruktioner i fält.

Det är en spännande utveckling som står för dörren inom CSHM området. Problem med kunskap och teknik kan vara stora men fördelarna som användandet av denna teknik ger är så stora att vi måste våga ta steget in i framtiden.

TILLSTÅNDSBEDÖMNING GENOM MÄTNING ANPASSAD FÖR
ANLÄGGNINGSKONSTRUKTIONER

REFERENSER

Andersson, J., (1993): Optiska sensorer övervakar betong och spännkablar, *Betong*. 1993, nr.2, p.9

Ansari, F. (1997): State-of-the-art in the Applications of Fiber-optic. Sensors to Cementitious Composites., *Cement and Concrete Composites*, Volume 19; pp 3-19; Elsevier Science Limited

Ansari, F. (2002): Fibre optics sensors and system for Structural Health Monitoring of infrastructure., *Proceedings of the First International Workshop on Structural Health Monitoring of Innovative Civil Engineering Structures.*, Winnipeg, Canada September 2002, ISBN:0-9689007-6-3, pp 5-2

Ansari, F, Maji A and Leung C (1997). *Intelligent civil engineering materials and structures*, A collection of state-of-the-art papers in the applications of emerging technologies to civil structures and materials. ASCE, New York 1997. 299 pp. ISBN 0-7844-0248-5

Bao, X.; Dhliwayo, J.; Heron, N.; Webb, D.J.; Jackson, D.A. (1995): Experimental and theoretical studies on a distributed temperature sensor based on Brillouin scattering., *Journal of Lightwave Technology*, Volume: 13, pp 1340 – 1348

Beckwith, T.G. and R.D. Marangoni, *Mechanical measurements*. Fourth ed. 1990, Reading, Massachusetts: Addison-Wesley.

- Björnfot, A.; Nilsson, M. and Elfgrén, L (2001): *Järnvägsbro över Luossajokk på Malmbanan. Utredning av påkänningar och förstärkningsbehov* Technical Report 2001:1, Division of Structural Engineering, Luleå University of Technology, Luleå, pp 32 + 7
- Bosch T., Lecure M. (1995) Selected Papers on Laser Distance Measurements, Distance Measurements, *SPIE Milestone Series, vol. 115*, pp. xi – xiii.
- Danielsson, G., Johansson, H., Thun, H. and Elfgrén L. (2002): *Töjningsmätningar på Järnvägsbro över Luossajokk I Kiruna*, Tekniskt rapport 2002:05 Testlab och avdelningen för Konstruktionsteknik, Luleå Tekniska Universitet.
- Dill, M.J. & Curtis, I.L., (1993): Monitoring of concrete structures using optical fibre sensors, *Concrete*.1993, 27 (5), 31-35 pp.
- Doebbling S, Farrar C.; Prime M., Shevitz D. (1996): *Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in Their Vibration Characteristics: A Literature Review*, Los Alamos National Laboratory, Report LA-13070-MS UC-900
- Enochsson, O., Hejll, A., Nilsson, M., Thun, H, Olofsson, T. and Elfgrén, L. (2002): *Bro över Luossajokk. Beräkning med säkerhetsindexmetod. Böjdragkapacitet i överkant i mittsnittet i kortas spannet* Technical Report 2002:06, Division of Structural Engineering, Luleå University of Technology, pp 93 .
- Fuhr, P.L; Huston, D.R & MacCraith, B (1998): Embedded fiber optic sensors for bridge deck chloride penetration measurement. *Optical Engineering*. 1998, (37) 4, 1221-1228 pp.

- Ghatak, A. Thyagarajan K. (1998): *Introduction to Fiber optics*. Cambridge University Press, Cambridge UK, ISBN 0-52157785-3; pp 565
- Hecht, J (1998): *Understanding Fiber Optics*, Third edition. Prentice-Hall, Inc., New Jersey 1998, 617 pp, ISBN 0-13-956145-5
- Hejll, A. (2002): Measurements of concrete structures – A way to improve assessment and strengthening methods *Proceedings to Nordic Concrete Research meeting*, Elsingore, Denmark, Published by Norsk Betongforening Oslo, Norway NO. 28 pp 146-149
- Hejll, A., Enochsson O. and Täljsten B. (2003): A structural health Diagnostic system (SHD) for Two railway bridges., *Proceedings for Structural Faults + Repair – 2003*, London, UK, Edited by Forde M. University of Edinburgh pp 86-86
- Hejll, A *Structural Health of Bridge, Monitor Asses and Retrofit*, Licentiate Thesis 2004:46, Division of Structural Engineering, Luleå University of Technology, Luleå, ISSN 1402-1757 / ISRN LTU-LIC--04/46--SE / NR 2004:46
- ICEM (-04 November 29th-December 1st 2004) <http://www.icem04.org/>
(Read:2004-10-12)
- Inaudi D. (2003): State of the Art in Fiber Optic Sensing Technology and EU Structural Health Monitoring Projects., *Proceedings for First International Conference on Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructure*, Tokyo, November 13-15 2003
- Inaudi, A. Elamari, L. Pflug, N. Gisin, J. Breguet, S. Vurpillot D. (1994) Low-coherence deformation sensors for the monitoring of civil-engineering structure., *Sensor and Actuators A*, Volume 44, pp 125-130

ISIS Canada, (2001), *Intelligent Sensing for Innovative Structures: Guidelines for Structural Health Monitoring*. Design Manual No. 2 ISBN:0-9689006-0-7.

Jarvis R.A. (1983) A Perspective on Range Finding Techniques for Computer Vision. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. PAMI-5(2), March 1983, pp. 122-139. Bosch T., Lecure M. (1995) *Selected Papers on Laser*.

Johnson T., Brown R., Adams D. and Schiefer M. (2004): Distributed structural health monitoring with a smart sensor array., *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volume 18 pp 555–572

Jönsson, S. (1995): *Fiberoptik*. Liber Utbildning, Stockholm, Sweden ISBN 91-634-1017-6, pp106

Kalamkarov, A.L., Georgiades, A.V., MacDonald, D.O & Fitzgerald, S.B, (2000). *Pultruded fibre reinforced polymer reinforcements with embedded fibre optic sensors*. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2000, 27 (5), 972-985 pp.

Keck D B (1996), *Optoelectronics in Japan and the United states, Chp6-Optical Sensor Technologies (1996):* http://itri.loyola.edu/opto/c6_s3.htm (read 2006-01-10)

König G. (2002): *Expert Opinion about the cracks in the webs of the Gröndals bridge*, Sweden. Report prepared by König und Heunisch, Planungsgesellschaft mbH, p 48

- Lecoeuche V., Webb D.J., Pannell C.N, Jackson D.A. (1999): 25 km Brillouin based single-ended distributed fibre sensor for threshold detection of temperature or strain., *Optics Communications*, Volume 168, pp 95–102
- Lee I, Libo Y, Ansari F & Ding H (1997): Fiber-optic Crack-tip Opening Displacement Sensor for Concrete, *Cement and Concrete Composites*, 1997, nr.19 , 59-68 pp.
- Leung C.K.Y. (2001): Fiber optic sensors in concrete: the future?, *NDT&E International*, Volume 34; pp 85–94; Elsevier Science Limited
- McConnell, K.G., *Vibration testing : theory and practice*. 1995, New York, Wiley.
- OFS-17 (May 23-27, 2005) <http://www.ofs17-bruges2005.be/bruges2005>
Read 2004-10-12
- Rippert, L. Wevers M. Van Huffel S. (2000): Optical and acoustic damage detection in laminated CFRP composite materials., *Composites Science and Technology*; Volume 60; pp 2713-2724; Elsevier Science Limited
- Rytter, A. (1993): *Vibration Based Inspection of Civil Engineering*. Ph.D. Dissertation, University of Aalborg, Denmark.
- Schulz W L, Udd E, Seim J M & McGill G E., (1998): Advanced fiber grating strain sensor systems for bridges, structures, and highways, *SPIE Proceedings*. 1998, vol. 3325, p. 212.

Simonsson, A., (2002): *Tillståndsbedömning av järnvägsbro. Mätning av töjningar och deformationer på grund av statisk och dynamisk last på järnvägsbro över Luossajokk i Kiruna.* Master Thesis 2002:357. Division of Structural Engineering, Luleå University of Technology, Luleå, pp 76

Sustainable Bridges (2004-08-16) <http://www.sustainablebridges.net> (read 2004-10-21)

Täljsten, B. and Carolin, A., (2003): Strengthening Two Large Concrete Bridges in Sweden for Shear Using CFRP Laminates, *Structural Faults and Repair 2003*, London, July 1-3 2003, CD-Proceedings.

Utsi, S., (2002): *Optical fibre sensors : for use in civil engineering structures : a review of literature.*, Technical Report 2002:11, Division of Structural Engineering, Luleå University of Technology

Wang, A., Zhang, P., May, R.G., Murphy, K.A, & Claus, R.O., (1994): Sapphire fiber-based polarimetric optical sensors for high temperature applications. *Proceedings of the International Society for Optical Engineering*, 1994, 2119, pp 13-22

Wolff, R. & Miesslerer, H., (1992): Monitoring of Prestressed Concrete Structures with Optical Fibre Sensors, *In Proc. 1 European Conference on smart Structures and Materials*, Glasgow.1992, 23-29 pp.

Yeh, C. (1990): *Handbook of fiber optics.* Academic Press San Diego USA ISBN 0-12-770455-8 pp 382

YTTERLIGARE REFERENSER AV INTRESSE

Adams, R., Cawley P., Pye C.J. and Stone B.J., (1978): A Vibration Technique for Non-Destructively Assessing the Integrity of Structures. *Journal of Mechanical Engineering Science* Volume 20, pp 93–100.

Ansari, F and Libo, Y (1998): Mechanics of bond and interface shear transfer in optical fiber sensors. *Journal of Engineering Mechanics*.124 (4), 385-394 pp

Bakis, C.E., Nanni, A., Terosky, J.A., Koehler, S.W., (2001): Self-monitoring, pseudo-ductile, hybrid FRP reinforcement rods for concrete applications. *Composites science and technology*, 2001, 61, 815-823 pp.

Begg R.D., Mackenzie A.C., Dodds C.J. and Loland A.C., (1976): Structural integrity monitoring using digital processing of vibration signals., *Offshore Technology Conference*, OTC 2549, pp. 305–311.

Bishop C. M., (1995) *Neural networks for pattern recognition* Oxford Univ. Press, Oxford UK, ISBN: 0-19-853864-2 pp 482

Calero, J., Wu, S.P., Pope, C., Chuang, S.L., Murtha, J.P., (1994): Theory and experiments on birefringent optical fibers embedded in concrete structures, *Journal of lightwave technology*. 1994, 12(6), pp 1081-1091.

Carolin, A., (2003): *Carbon fibre reinforced polymers for strengthening of structural elements*, Dissertation Thesis 2003:18, Division of Structural Engineering, Luleå University of Technology, Luleå, ISSN 1402-1544 / ISRN LTU-DT--03/18--SE / NR 2003:18

Chance J., Tomlinson G. R. and Worden K., (1994): A Simplified Approach to the Numerical and Experimental Modelling of the Dynamics of a Cracked Beam *Proceedings of the 12th International Modal Analysis Conference*. Nashville, TN USA, p.778

Chang P., Alison F. and S. C. Liu C. S., (2003): Review Paper: Health Monitoring of Civil Infrastructure *Structural Health Monitoring*, Volume 2, pp 257 – 267

Dakin, J. Culshaw; B (1988) *Optical fiber sensors. Vol. 1, Principles and components*. Artech House, Boston USA ISBN: 0-89006-317-6 pp327

Danielsson, G., Johansson, H., Thun, H. and Elfgren L. (2002): *Töjningsmätningar på Järnvägsbro över Luossajokk I Kiruna*, Tekniskt rapport 2002:05 Testlab och avdelningen för Konstruktionsteknik, Luleå Tekniska Universitet.

Diamantides, D., (2001):, *Probabilistic Assessment of Existing Structures.*, A Publication of the Joint Committee on Structural Safety (JCSS). RILEM Publications Sarl, Cachan Cedex, France, 162 pp.

Ditlevsen, O., H. O. Madsen, (1996): *Structural Reliability Methods* John Wiley & Sons, Chichester, England, 372 pp.

Escobar P, Gusmeroli V, Martinelli M, Lanciani I & Morabito P (1992): Fiber-optic interferometric sensors for concrete structures, *Proc. 1st Eur. Conf. on Smart Structures and Materials* (Glasgow, 1992), 215-218pp.

Fausett L. (1994): *Fundamentals of Neural Networks* Prentice-Hall, London UK ISBN: 0 13 042250 9 pp 461

Friswell M. I., Penny J. E. T., (1997): Is damage location using vibration measurements practical. *Proceedings for: EUROMECH 365 International Workshop: DAMAS 97, Structural Damage Assessment using Advanced Signal Processing Procedures*, Sheffield, UK, June/July 1997

Fuhr, P.L, Huston, D.R, Ambrose, T.P, Snyder, D.M., (1993): Stress monitoring of concrete using embedded optical fibre sensors, *Journal of structural engineering*. 1993, nr7, 2263-2269.

Grattan K. T. V. and Sun T (2000): Fiber optic sensor technology: an overview., *Sensors and Actuators*, Volume 82, pp 40–61, Elsevier Science Limited

Grattan, K. Meggit B. (2000): *Optical Fiber Sensor Technology – Fundamentals.*, London UK, Kluwer Academic Publishers ISBN: 0-7923-7852-0 pp 334

Gumundsen P. (1982): Eigenfrequency changes of structures due to cracks, notches or other geometrical changes. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Volume 30, pp 339-353

Gurney K. (1997): *An introduction to neural networks* ISBN: 1-85728-673-1 UCL Press London UK, pp 234

Habel W R, Höpcke M, Basedau F & Polster H (1994): The influence of concrete and alkaline solutions on different surfaces of optical fibres for sensors, *Proc. 2nd Eur. Conf. on Smart Structures and Materials* (Glasgow, 1994), 168-171 pp.

Helmut,W. (1979) *Handbook of fiber optics :theory and applications.* ISBN: 0-8240-7054-2 pp 544

ISIS Canada 2004 (No date)
<http://130.179.57.204/ActiveSHM/TBmainpages/TBhome.htm> (Read:
2004-10-08)

JCSS PMC, (2001): *Probabilistic Model Code*, Issued by the Joint Committee on Structural Safety, JCSS, 12th Draft, March 2001. 1. Basis of Design, 62 pp; 2. Load Models, 73 pp; 3. Material properties, 43 pp

Kersey A. D, Davis M. A, Berkoff T.A & Jones R. T (1997): *Fiber Optic Sensors for structural monitoring*, Control Proceedings of the 1997 ISA TECH/EXPO Technology Update. Part 1/5 Oct 7-9 1997, Anaheim, CA. p 129-137, ISSN 1054-0032

Liu G. R., Xu, Y. G., Wu Z. P., (2001): Total solution for structural mechanics problems. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering.*, Volume 191 pp 989-1012

LLoret S., Daniele Inaudi D. (2000): Amplitude modulation of a low-coherence source, applications to distance and dynamic displacement sensing., *Optics and Lasers in Engineering*, Volume 32, pp 325-337, Elsevier Science Limited

Lou, K-A., Schaefer, P., (1997): Optimal fiber optics, *Civil Engineering*. 1997, 67(6), pp 62-68.

Luo, F., Liu, J., Chen, S., (1997): Fiber optic distributed sensing scheme for monitoring structural strain and deformation, *Optical Engineering*. 1997, 36(5), pp 1548-1551.

- Maaskant R.; Alavie T., Measures R. M.; Tadros G., Rizkalla S. H. and Guha-Thakurta A. (1997): Fiber-optic Bragg Grating Sensors for Bridge Monitoring., *Cement and Concrete Composites*, Volume 19, pp 21-33, Elsevier Science Limited
- Mallet G. P., (1994): *Repair of concrete bridges.*, published by Thomas Telford, London UK., ISBN: 0-72277-2007-4, pp194
- Masri, S.F., Mustafa, M., (1993): Experimental study of embedded fiber optic strain gages in concrete structures, Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering Smart Structures and Materials 1993: Smart Sensing Sensing, processing, and Instrumentation. 1993, v. 1918.
- Merzbacher C I, Kersey A D & Friebele E J (1996): Fiber optic sensors in concrete structures: a review. *Smart Materials and Structures*, 1996, nr.5, 196-208 pp
- Mufti A. (2003): FRPs and FOSs lead to innovation in Canadian civil engineering structures., *Construction and Building Materials*, Volume 17, pp 379–387 Elsevier Science Limited
- Nilsson, M, Ohlsson, U. and Elfgren L. (1999): Partialkoefficienter för hållfasthet för betongbroar längs Malmbanan (Partial Coefficients for Concrete Bridges along Malmbanan). Technical Report 1999:03, Division of Structural Engineering, Luleå University of Technology Luleå 1999, pp 38 + 38. .
- Olofsson T., Hejll A. and Täljsten B. 2002 Structural Health Monitoring of two Railway Bridges *Proceedings of the First International Workshop on Structural Health Monitoring of Innovative Civil Engineering Structures* Winnipeg, Canada, Edited by Mufti A. ISBN:09689007-6-3 pp 435-444

- Othonos A (1997): Fiber Bragg gratings, Scientific Instruments. 1997, 68 (12), 4309-4341 pp.
- Pallás-Areny R. and Webster J.G., (2001): *Sensors and signal conditioning*, 2nd ed., 2001, New Yourk, ISBN 0-471-33232-1, John Wiley & Sons Inc., p 587.
- Paulsson, B., B. Töyrä, (1996): *Infrastruktur. Broar och geoteknik. 30 ton på Malmbanan* Rapport 3.0 Infrastruktur, Swedish Railway Authorities, Borlänge, Sweden, pp 34 pages in Swedish
- Pomarico A, Enrique S. E, Patrignani D & Pasquale L (1999): Optical fiber strain gauge based on speckle correlation. *Optics & Laser Technology*. (1999), 31 (3), 219-224 pp.
- Quirion, M., Ballivy, G., (2000): Laboratory investigation of Fabry-Perot sensor and conventional extensometers for strain measurement in high performance concrete, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2000, 27 (5), 1088-1093 pp.
- Rao, Y J (1997): In-fibre Bragg grating sensors. *Measurement & Science Technolgy*, 1997, nr.8 , 355-375 pp
- Rao, Y.J (1999): *Recent progress in applications of in-fibre Bragg grating sensors*, *Optics and lasers in engineering*, (199), 31 (4), 297-324 pp
- Rizkalla, S; Shehata, E; Abdelrahman, A & Tadros G, (1998): The new generation. *Concrete international*, 1998, 20 (6), pp 35-38.
- Ryall M. J. (2001): *Bridge Management* Butterworth-Heinemann Kent, UK, ISBN: 0-7506-5077-X pp 450.

- Seim J, Udd E, Schulz W. & Laylor, H.M., (1999): Composite strengthening and instrumentation of the Horsetail Falls Bridge with long gauge length fiber Bragg grating sensors, *SPIE Proceedings*, 1999, vol. 3746, p. 196.
- Smith, J, Bao, X & Bremmer, T, (2000): Distributed strain sensing for structural monitoring applications, *Canadian Journal of Civil Engineering*. 2000, 27 (5), 873-881 pp.
- Tennysson R. C., (1998): *Installation Use and Repair of Fibre Optic Sensors The University of Toronto*, Institute for Aerospace Studies, ISIS-Canada (Intelligent Sensing for Innovative Structures, Winnipeg), Toronto, Ontario, Second edition 1998, p. 74.
- Täljsten B, and Carolin A (1999): *Bridge Strengthening with CFRP - Railroad Bridge in Luleå*, Luleå: Division of Structural Engineering, Luleå University of Technology, ISSN 1402-1532, Technical Report 1999:18. 61pp
- Täljsten B. (1994): *Plate Bonding, Strengthening of Existing Concrete Structures with Epoxy Bonded Plates of Steel or Fibre reinforced Plastics* Doctoral Thesis 1994:152D, Division of Structural Engineering, Luleå University of Technology, ISSN 0348 – 8373, pp 308.
- Täljsten B. (1996): Strengthening of concrete prisms using the plate-bonding technique *International Journal of Fracture* Volume 82, pp 253-266
- Täljsten B. (1997a): Strengthening of concrete structures for shear with bonded CFRP-fabrics *Recent advances in bridge engineering, advanced rehabilitation, durable materials, nondestructive evaluation and management*, Eds. U. Meier and R. Bettid, Dubendorf July 1997, pp 57-64.

- Täljsten B. (1997b): Strengthening of Beams by Plate Bonding, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Volume 9, issue 4, pp. 206-212.
- Täljsten B. (1997c): Defining anchor lengths of steel and CFRP plates bonded to concrete., *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Volume 17, Number 4, pp 319-327.
- Täljsten B. (1998): Strengthening of Concrete Structures for Shear with CFRP-fabrics, Test and Theory, *Proceedings of International Conference in Tromsø, Norway, Concrete under severe conditions*, Edited by O.E. Gjörv, K. Sakai and N. Banthia, ISBN 0 419 23870 0, pp. 1298-1310.
- Täljsten B. (2000a) *Förstärkning av befintliga betongkonstruktioner med kolfiberväv eller kolfiberlaminat, Dimensionering, material och utförande* Technical Report, Division of Structural Engineering, Luleå University of Technology, 2000:16, ISSN 1402 – 1536, 2000, p 133 .
- Täljsten B. (2000b): Strengthening of concrete structures with CFRP-sheets. Applications and full scale tests in Sweden, *Proceedings of the 3rd Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures*, Ottawa, August 2000, pp 513-520.
- Täljsten B. (2004): FRP Strengthening of existing concrete structures – Design guidelines, Third Edition, ISBN: 91-89580-03-6 pp 228
- Täljsten B., Hejll A. and Olofsson T. (2002): Health Monitoring and Assessment of Railway Bridges *Proceedings of the First European Workshop on Structural Health Monitoring: 2002*, Cachan (Paris), France, Edited by Balageas D. ISBN: 1-932078-08-8 pp1286-1293

- Thun, H. (2001): *Evaluation of Concrete Structures. Strength Development and Fatigue Capacity* Licentiate Thesis 2001:25, Division of Structural Engineering, Luleå University of Technology, Luleå 2001, 164 pp. ISBN 91-89580-08-2.
- Thun, H., Ohlsson U. and Elfgren, L. (1999): Betonghållfasthet i järnvägsbroar på Malmbanan. – Karakteristisk tryck- och draghållfasthet för 20 broar mellan Luleå och Gällivare Technical Report 1999:02, Division of Structural Engineering, Luleå University of Technology, pp 34.
- Udd, E., Schultz, W.L., Seim, J., Corona-Bittick, K.,Dorr, J.,Slattery, K., Laylor, H.M., McGill, G., (1999): Fiber Optic Smart Bearing Load Structure. *SPIE Proceedings* 1999, vol. 3587, p. 40.
- Vandiver K. (1977) Detection of Structural Failure on Fixed Platforms by Measurement of Dynamic Response., *Journal of Petroleum Technology*, XXIX pp305-310 (not read)
- Vandiver K. and Shuhei Mitome S. (1979): Effect of liquid storage tanks on the dynamic response of offshore platforms., *Applied Ocean Research*; Volume 1; pp 67-74
- von Scholten C., Enevoldsen I., Arnbjerg-Nielsen T., Randrup-Thomsen S., Sloth M., Engelund S., Michael Faber M., (2004): *Reliability-Based Classification of the Load Carrying Capacity of Existing Bridges.*, Road Directorate Copenhagen Denmark ISBN:87-7923-774-6 pp 54
- Wang, W. and Zhang A., (1987): Sensitivity Analysis in Fault Vibration Diagnosis of Structures in *Proceedings of 5th International Modal Analysis Conference* London UK, pp 496–501

Yuan, L. & Ansari, F., (1998): Embedded white light interferometer fibre optic sensor for monitoring crack- tip opening in concrete beams, *Measurement Science Technology*. 1998, 9(2), pp 261-266.