



EXAMENSARBETE INOM BYGGTEKNIK OCH DESIGN,
GRUNDNIVÅ, 15 HP

STOCKHOLM, SVERIGE 2019

Implementering av Structural Health Monitoring

SHM-system för detektering och övervakning av vanligt förekommande skador på betongbroar

JONATHAN LE GUILLARME

JAKOB LINDSTAM

Implementering av Structural Health Monitoring

SHM-system för detektering och övervakning av vanligt förekommande skador på betongbroar

Implementation of Structural Health Monitoring

SHM-system for detection and monitoring of common occurring damages on concrete bridges

Författare:	Jonathan Le Guillarme och Jakob Lindstam
Uppdragsgivare:	Research Institutes of Sweden (RISE)
Handledare:	Nadia Al-Ayish, RISE, CBI Betonginstitutet Patrice Godonou, KTH ABE
Institution:	Skolan för arkitektur och samhällsbyggnad vid KTH
Examensarbete:	15 högskolepoäng inom byggt teknik och design
Examinator:	Johan Silfwerbrand
Godkännandedatum:	2019-06-19
Serienummer:	TRITA-ABE-MBT-19290

Sammanfattning

Sverige har som många länder runt om i världen en åldrande infrastruktur och behovet av underhåll stiger. I en artikel i Svenska Dagbladet från 21/9–2018 redovisar analys- och teknikkonsultföretaget WSP en grov uppskattning att 300 miljarder kronor behöver investeras för att rusta upp existerande infrastruktur. Efter upprustningen skulle det krävas ca 25 miljarder kronor årligen för att utföra löpande tillståndsbedömning och underhåll av Sveriges väg- och järnvägsnät. Idag används inspektioner för att bedöma broars tillstånd. Det finns tre olika inspektionstyper; huvudinspektion, allmäninspektion och särskild inspektion.

Structural Health Monitoring (SHM) är en teknik som globalt används mer och mer som en metod vid tillståndsbedömning av broar. SHM siktar mot att i realtid utföra automatisk bedömning av hela konstruktionens och de enskilda skadornas tillstånd. SHM använder sig av sensorer placerade på kritiska positioner för att samla in mätdata som jämförs med i förtid definierade gränsvärden.

I Sverige används SHM sparsamt idag där kunskapen ligger på akademisk nivå och det råder en osäkerhet om hur SHM ska implementeras i praktiken. Genom att implementera SHM, kan skador upptäckas i ett tidigt skede och minimeras genom att snabbt utföra reparationer på konstruktionen innan skadorna blivit kritiska.

Studien syftar till att producera en rapport som kan användas som en guide för hur SHM kan implementeras samt visa på hur SHM-systemen har implementerats på tidigare projekt. Rapporten skall ge läsaren en helhetsbild över hur tillståndsbedömning går till idag, vilka skador som är vanligt förekommande samt hur SHM kan användas som ett verktyg vid tillståndsbedömning. Rapporten syftar också till att ge en övergripande förklaring på svenska av SHM-tekniken och vad som behövs för implementering.

Öppna ostrukturerade intervjuer genomfördes med forskare inom SHM och skador på betongkonstruktioner samt sakkunniga inom tillståndsbedömning. Intervjuerna användes som utgångspunkt för vidare studier av vanligt förekommande skador och SHM-tekniker. I litteraturstudien användes olika vetenskapliga databaser såsom Diva och ScienceDirect, samt KTH:s bibliotek för att få fram tidigare material om betongskador på broar, deras skademekanismer och om SHM-tekniken. Vidare hämtades information från ett antal doktorsavhandlingar, artiklar och tidigare examensarbeten.

Genom litteraturstudie och intervjuer med sakkunniga kom studien fram till att armeringskorrosion och sprickor i betongen är skador som är vanligt förekommande i betongbroar. Skadornas skademekanismer beskrivs i rapporten. Studien identifierade tre olika system som kan användas för detektering och övervakning av armeringskorrosion och sprickor, de systemen är akustisk emission, SOFO-system (SOFO är en förkortning för Surveillance d'Ouvrage par Fibers Optics) och MuST-system (MuST är ett kommersiellt namn). Rapporten ger exempel på hur systemen kan användas för detektering och övervakning av skadorna genom att presentera fyra fallstudier där systemen har använts. Två av fallstudierna presenterar hur akustisk emission har implementerats och två av fallstudierna presenterar hur SOFO-systemet har implementerats. Studien kunde inte identifiera någon fallstudie för MuST-systemet och hur systemet har implementerats.

Slutsatsen av studien är att SHM kan användas som ett komplement vid tillståndsbedömningar men man kan inte utföra automatiserade tillståndsbedömningar idag.

Nyckelord: Structural Health Monitoring, Tillståndsbedömning, Övervakning med sensorteknik, Fiberoptiska sensorer, Akustisk emission, Brokonstruktioner, Betongskador, Skademekanismer

Abstract

Like many countries around the world, Sweden has an aging infrastructure and the need for maintenance is increasing. In an article in Svenska Dagbladet from 21 / 9–2018, the analysis and engineering consulting company WSP reports a rough estimate that SEK 300 billion needs to be invested to upgrade existing infrastructure. After the upgrade, it would require approximately SEK 25 billion annually to carry out ongoing condition assessment and maintenance of Sweden's road and railway networks. Today, inspections are used to assess the condition of bridges. There are three types of inspection; main inspection, general inspection and special inspection.

Structural Health Monitoring (SHM) is a technology that is globally more used as a method for condition assessment of bridges. SHM aims to perform automatic assessment of the state of the entire construction and individual damages in real time. SHM uses sensors placed at critical positions to collect measurement data compared to pre-defined limit values.

In Sweden, SHM is used sparingly today, where knowledge is at an academic level and there is uncertainty about how SHM should be implemented in practice. By implementing SHM, damage can be detected at an early stage and minimized by quickly performing repairs on the design before the damage becomes critical.

The study aims to produce a report that can be used as a guide on how SHM can be implemented and show how the SHM systems have been implemented on previous projects. The report should give the reader an overall picture of how condition assessment is performed today, which damages are common and how SHM can be used as a tool when assessing the condition. The report also aims to provide an overall explanation in Swedish of the SHM technology and what is needed for implementation.

Open unstructured interviews were conducted with researchers within SHM and damages to concrete structures as well as experts in condition assessment. The interviews were used as a starting point for further studies of commonly occurring damages and SHM techniques.

In the literature study, various scientific databases were used, such as Diva and ScienceDirect, as well as KTH's library to obtain earlier material on concrete damage to bridges, its damage mechanisms and about SHM technology. Furthermore, information was obtained from a number of doctoral dissertations, articles and previous degree projects.

Through literature study and interviews with experts, the study concluded that reinforcement corrosion and cracks in the concrete are damages that are commonly found in concrete bridges. The damage mechanisms are described in the report. The study identified three different systems that can be used for detection and monitoring of reinforcement corrosion and cracks, those systems are acoustic emission, SOFO system (SOFO is an abbreviation for Surveillance d'Ouvrage pair of Fiber's Optics) and MuST system (MuST is a commercial name). The report gives examples of how the systems can be used for the detection and monitoring of the damages by presenting four case studies where the systems have been used. Two of the case studies present how acoustic emission has been implemented and two of the case studies present how the SOFO-system has been implemented. The study could not identify any case study for the MuST-system and how the system was implemented.

The conclusion of the study is that SHM can be used as a supplement to condition assessments but cannot for the time being used for performing automated condition assessments today.

Keywords: Structural Health Monitoring, Bridge Maintenance, Monitoring With Sensor Technology, Fibre Optical Sensors, Acoustic Emission, Bridge Constructions, Concrete Damages, Damage Mechanisms

Förord

Med det här examensarbetet avslutar vi vår utbildning på högskoleingenjörsprogrammet Byggteknik och Design med inriktning mot anläggning på Kungliga Tekniska Högskolan.

Vi vill passa på att tacka de personer som har gjort det möjligt för oss att skriva detta examensarbete. Vi vill börja med att tacka vår näringslivshanledare på RISE, Nadia Al-Ayish. Nadia har alltid funnits till hands för att svara på frågor och har visat stort tålamod när hon har väglett oss. Vi vill också tacka alla anställda på betongheten inom RISE i Stockholm som alltid har haft tid att delge sin kunskap om diverse ämnen.

Vi vill även tacka alla på företaget ÅF:s anläggning avdelning. Specifikt Anders Strömgren, Mathias Varedian och Viktor Ansnaes. Anders vill vi tacka för hans initiala intresse för vårt examensarbete och hans vilja att ha ett nära samarbete. Vi vill tacka Viktor för att han ställde upp på intervju där vi fick insikt i hur en broinspektion går till. Mathias ska ha tack för att han var väldigt välkomnande och gjorde det till sin uppgift att inkludera oss i ÅF:s dagliga rutiner.

Tack till vår akademiska handledare Patrice Godonou.

Stockholm, maj 2019

Jonathan Le Guillarme & Jakob Lindstam

Definitioner

Depassivera: pH-värdet lokalt runt stålet sänks till en farlig nivå.

Interferometri: Mätning av vågors förstärkning eller försvagning mellan vågor från en källa.

Laddningssymmetri: En av tre symmetriprinciper från fysikens grundmodell.

Symmetricentrum: Beskriver en kristalls symmetri.

Transduktor: Magnetisk förstärkare

Wheatstone brygga: En elektrisk krets där tre kända och ett okänt motstånd kopplas över en galvanometer för att med stor noggrannhet bestämma det okända motståndet.

Signal-brusförhållandet: Förhållandet på signalens nivå och de brus som finns i signalen.

Akronymer

AE: Akustisk Emission

ADO: Analog-Digital Omvandlare

BaTMan: Trafikverkets förvaltningssystem över broar och tunnlar

COST: The European Cooperation in Science and Technology

DOF: Distributed Optical Fibers

FBG: Fiber Bragg Gitter

FHWA: Federal Highway Agency

FP: Förstorande Provning

LCA: Livscykelanalyser

LCC: Livscykelkostnader

LVDT: Linear Variable Differential Transformers

MMF: Multimod Fiber

OFP: Oförstorande Provning

POF: Plastic Optical Fiber

PVC: Polyvinylklorid

RISE: Research Institutes of Sweden

SMF: Singelmodfiber

SHM: Structural Health Monitoring

SOFO: Surveillance d'Ouvrage par Fibers Optics

MEMS: Micro-Electro-Mechanical Systems

Innehållsförteckning

1	INLEDNING	1
1.1	BAKGRUND	1
1.2	SYFTE OCH FRÅGESTÄLLNING	2
1.3	MÅL	2
1.4	AVGRÄNSNINGAR	2
2	GENOMFÖRANDE OCH METOD	3
2.1	GENOMFÖRANDE	3
2.2	METOD	3
2.2.1	Litteraturstudie	3
2.2.2	Intervjuer	4
2.2.3	Fallstudier	4
3	NULÄGESBESKRIVNING	5
4	TILLSTÅNDSBEDÖMNING AV BROAR	7
4.1	INLEDNING	7
4.2	SKADEDETEKTERING, SKADEÖVERVAKNING OCH TILLSTÅNDSBEDÖMNING	7
4.3	INSPEKTIONSMETODER	7
4.3.1	Okulär inspektion	7
4.3.2	Oförstörande provning	8
4.3.3	Förstörande provning	9
4.4	INSPEKTIONSTYPER	9
4.5	TILLSTÅNDSKLASSER	10
4.6	TRAFIKVERKETS FÖRVALTNINGSSYSTEM BATMAN	10
5	BETONGKONSTRUKTIONERS SKADOR OCH DESS SKADEMEKANISMER	11
5.1	INLEDNING	11
5.2	SKADOR PÅ BETONGKONSTRUKTIONER	11
5.2.1	Sprickor i betong	11
5.2.2	Skador orsakad av armeringskorrosion	14
5.3	SKADEMEKANISMER	15
5.3.1	Frostangrepp	15
5.3.2	Saltfrostangrepp	15
5.3.3	Armeringskorrosion föranlett av karbonatisering och kloridinträngning	16
5.3.4	Sulfatangrepp	16
6	STRUCTURAL HEALTH MONITORING	17
6.1	INLEDNING	17
6.2	SKADEDETEKTERING, SKADEÖVERVAKNING OCH TILLSTÅNDSBEDÖMNING MED SHM	18
6.3	LOKAL ELLER GLOBAL MÄTNING AV KONSTRUKTIONER	19
6.4	LAGRING AV MÄTDATA	19
7	MÄTUTRUSTNING	21
7.1.1	Sensorer	21
7.1.2	Dataöverföring	21
7.1.3	Signalöverbrygning	21
8	TRADITIONELLA SENSORERTYPER	23
8.1	INLEDNING	23
8.2	PIEZOELEKTRICITET OCH PIEZORESISTIV	23
8.3	ACCELEROMETRAR	23
8.4	TRÅDTÖJNINGSGIVARE	23
8.5	LUTNINGSMÄTARE	24
8.6	LINEAR VARIABLE DIFFERENTIAL TRANSFORMERS	24
8.7	MEMS SENSORER	24

9	FIBEROPTISKA SHM-SYSTEM	25
9.1	INLEDNING	25
9.2	FIBEROPTISKA KABLAR.....	25
9.3	ANDRA ANVÄNDNINGSSOMRÅDEN FÖR FIBEROPTISKA KABLAR ÄN SENSORER	26
9.4	FIBEROPTISKA SENSORER	26
9.4.1	<i>Intensiometrisk fiberoptisk sensor.....</i>	<i>27</i>
9.4.2	<i>Extrinsisk fiberoptisk sensor</i>	<i>28</i>
9.4.3	<i>Fiber Bragg Gitter.....</i>	<i>29</i>
9.4.4	<i>Fabry-Perot sensorer</i>	<i>29</i>
9.4.5	<i>Michelson and Mach Zehnder interferometrar</i>	<i>30</i>
9.4.6	<i>Distributed Optical Fiber Sensor</i>	<i>30</i>
9.5	FIBEROPTISKA SENSORSYSTEM FÖR SPRICKOR.....	31
9.5.1	<i>SOFO system.....</i>	<i>31</i>
9.5.2	<i>MuST-system</i>	<i>33</i>
9.6	PRESENTATION AV EN FALLSTUDIE PÅ SPRICKÖVERVAKNING MED ETT SOFO SYSTEM	34
9.6.1	<i>Inledning.....</i>	<i>34</i>
9.6.2	<i>Bakgrund</i>	<i>34</i>
9.6.3	<i>Fallstudiens genomförande</i>	<i>34</i>
9.6.4	<i>Fallstudiens resultat</i>	<i>35</i>
9.7	PRESENTATION AV EN FALLSTUDIE PÅ SPRICKDETEKTERING MED ETT SOFO SYSTEM.....	37
9.7.1	<i>Inledning.....</i>	<i>37</i>
9.7.2	<i>Bakgrund</i>	<i>37</i>
9.7.3	<i>Fallstudiens genomförande</i>	<i>39</i>
9.7.4	<i>Fallstudiens resultat</i>	<i>41</i>
10	AKUSTISK EMISSION SHM-SYSTEM.....	43
10.1	INLEDNING	43
10.2	AE-SYSTEM	43
10.3	AE-SENSORER.....	44
10.4	PARAMETRISK INDATA	44
10.5	FÖRFÖRSTÄRKARE	45
10.6	AE DATAINSAMLINGSENHET	45
10.7	AE SIGNALER	46
10.8	KALIBRATORER	46
10.9	PRESENTATION AV FALLSTUDIE ÖVER SPRICKÖVERVAKNING MED ETT AE-SYSTEM	47
10.9.1	<i>Inledning</i>	<i>47</i>
10.9.2	<i>Bakgrund.....</i>	<i>47</i>
10.9.3	<i>Fallstudiens genomförande.....</i>	<i>47</i>
10.9.4	<i>Fallstudiens Resultat</i>	<i>48</i>
10.10	PRESENTATION AV FALLSTUDIE PÅ ÖVERVAKNING AV KORROSION I SPÄNNARMERING MED ETT AE-SYSTEM	50
10.10.1	<i>Inledning</i>	<i>50</i>
10.10.2	<i>Bakgrund.....</i>	<i>50</i>
10.10.3	<i>Fallstudiens genomförande.....</i>	<i>51</i>
10.10.4	<i>Fallstudiens resultat.....</i>	<i>52</i>
11	SAMMANFATTNING AV INTERVJUSTUDIEN	53
11.1	INLEDNING	53
11.2	SAMMANFATTNING AV INTERVJU MED JOHAN SILFWERBRAND	53
11.3	SAMMANFATTNING AV INTERVJU MED RAID KAROUMI	54
11.4	SAMMANFATTNING AV INTERVJU MED JOHN LEANDER	55
11.5	SAMMANFATTNING AV INTERVJU MED VIKTOR ANSNAES	56
12	RESULTAT	57
12.1	INLEDNING	57
12.2	LITTERATURSTUDIE.....	57
12.3	INTERVJUER	57
13	DISKUSSION OCH ANALYS	59

13.1	INTERVJUER	59
13.2	LITTERATURSTUDIER	60
13.3	GENERELL DISKUSSION.....	60
14	SLUTSATS.....	63
14.1	GENERELLA SLUTSATSER	63
14.2	FÖRSLAG PÅ FORTSATTAS STUDIER	63
15	REKOMMENDATIONER	65
REFERENSER.....		
BILAGA A REDOGÖRELSE AV INTERVJUER.....		I
	BILAGA A1 REDOGÖRELSE AV INTERVJU MED JOHAN SILFWERBRAND 3/4–19	II
	BILAGA A2 REDOGÖRELSE AV INTERVJU MED RAID KAROUMI 4/4–19	IV
	BILAGA A3 REDOGÖRELSE AV INTERVJU MED JOHN LEANDER 24/4–19	VII
	BILAGA A4 REDOGÖRELSE AV INTERVJU MED VIKTOR ANSNAES 26/4–19	XI

1 Inledning

1.1 Bakgrund

2005 presenterade den amerikanska US Federal Highway Agency (FHWA) att 28 % av deras 595 000 broar är bedömda som bristfälliga. Utav dessa är 15 % strukturellt bristfälliga. I Europa anges den siffran till 10 %. Liknande uppskattning för brobeståndet i resten av världen finns inte tillgängligt. I det globala transportnätverket finns cirka 2,5 miljoner broar i drift. Nuvarande nationella brohanteringssystem i olika länder räknar sitt brobestånd med olika metoder. Det resulterar i inhomogen statistik och en viss osäkerhet. Antas det att globalt är 10 % av brobeståndet strukturellt bristfälliga så är det fortfarande ca 250 000 broar globalt som definitivt kräver tillståndsbedömning och underhåll (Wenzel, 2009).

Sverige har som många länder runt om i världen en åldrande infrastruktur och behovet av underhåll stiger. I en artikel i Svenska Dagbladet från 21/9–2018 redovisar analys- och teknikkonsultföretaget WSP en grov uppskattning att 300 miljarder kronor behöver investeras för att rusta upp existerande infrastruktur. Efter upprustningen skulle det krävas ca 25 miljarder kronor årligen för att utföra löpande tillståndsbedömning och underhåll av Sveriges väg- och järnvägsnät (Törnwall, 2018).

En liknande uppskattning av hur stor procent av Sveriges broar som är strukturellt bristfälliga finns inte, men om man antar att 10 % av Sveriges vägbrobestånd är strukturellt bristfälliga så är det ca 1600 broar som är i akut behov av tillståndsbedömning och underhåll.

Idag används både traditionell okulär inspektion, oförstörande provning (OFP) och förstörande provning (FP) som metoder vid tillståndsbedömning i Sverige (Ansnaes, 2019), globalt sätt används Structural Health Monitoring (SHM) mer och mer som komplement vid tillståndsbedömning av konstruktioner och för att utforma underhållsplaner (Karoumi, 2019).

SHM syftar till processen kring skadeidentifiering och övervakning av konstruktioners hälsa. SHM utvecklades inom rymd- och flygindustrin och behovet av kontinuerlig mätning är fortfarande störst inom dessa industrier. Men byggindustrin börjar få upp ögonen för tekniken och man kan se ett allt större intresse för användning av SHM inom byggindustrin globalt (Wenzel, 2009).

Vid SHM används sensorer placerade på kritiska positioner för att i realtid mäta förändringar i konstruktionens beteende, exempelvis töjningar, nedböjningar och sättningar för att sedan rapportera avvikande beteende i förhållande till i förtid definierade gränsvärden.

Idag används SHM sparsamt i Sverige vid tillståndsbedömning där kunskapen ligger på akademisk nivå. Det råder en osäkerhet om hur SHM ska implementeras vid tillståndsbedömning i praktiken (Leander, 2019). Genom att implementera SHM, kan man i ett tidigt skede upptäcka skador och minimera deras spridning genom att snabbt utföra reparationer på konstruktionen innan tillståndet blivit kritiskt.

Byggsektorn söker alltid efter nya metoder för att effektivisera de olika arbetsmomenten. Studien behövs för att överbygga kunskapsbristen som finns angående SHM. Studien behövs också för den svenska marknaden då väldigt lite material finns skrivet om SHM på svenska.

1.2 Syfte och frågeställning

Studien syftar till att producera en rapport som kan användas som en guide för hur SHM kan implementeras samt visa på hur SHM-systemen har implementerats på tidigare projekt. Rapporten skall ge läsaren en helhetsbild över hur tillståndsbedömning går till idag, vilka skador som är vanligt förekommande samt hur SHM kan användas som ett verktyg vid tillståndsbedömning. Rapporten syftar också till att ge en övergripande förklaring på svenska av SHM-tekniken och vad som behövs för implementering.

Frågeställning:

- Vilken SHM-teknik finns idag?
- Vilka SHM-system kan användas som komplement för att upptäcka och övervaka vanligt förekommande skador vid tillståndsbedömning?

För att kunna svara på frågeställningen kommer rapporten att undersöka:

- Vilka skador är vanligt förekommande på betongbroar?
- Hur görs tillståndsbedömningar idag?

1.3 Mål

Målsättningen med studien är att kartlägga vanligt förekommande skador på betongbroar, beskriva skadornas skademekanismer och presentera ett fåtal SHM-system som kan användas som komplement vid tillståndsbedömning.

1.4 Avgränsningar

Examensarbetet är avgränsat till vanligt förekommande skador på svenska vägbroar där den bärande konstruktionen är utförd i betong. Litteraturstudien behandlar information från Sverige samt utländska källor.

Skadorna är avgränsade till de skador som intervjuerna kom fram till som vanligt förekommande och dessa är:

- Armeringskorrosion
- Sprickor i betong

SHM-systemen är avgränsade till system som kunde identifieras utifrån de SHM-tekniker som kom fram under intervjuerna som intressanta att undersöka, dessa är:

- Akustik emission
- SOFO
- MuST

2 Genomförande och metod

2.1 Genomförande

Studien genomfördes under 10 veckor i samband med Research Institutes of Sweden (RISE) som tidigare hette CBI Betonginstitutet. En litteraturstudie användes kontinuerligt genom hela studien. Genom tidig litteraturstudie identifierades intervjuobjekt inom tre olika områden, vilka var, tillståndsbedömning av broar, skador på betongkonstruktioner och deras skademekanismer samt SHM. Det identifierades en sakkunnig inom tillståndsbedömning, en inom skador på betongkonstruktioner och dess skademekanismer samt två sakkunniga inom SHM. För varje intervjuobjekt utformades specifika frågor, men intervjuobjekten gavs utrymme att utveckla intervjuerna. Då intervjuerna användes som utgångspunkt för vidare litteraturstudier så bokades de in och genomfördes tidigt i arbetet. Efter intervjuerna var genomförda och renskrivna så fortsatte litteraturstudien. Litteraturstudien användes för att få fram kompletterande fakta till den information som kom fram under intervjuerna. När faktainsamlingen var slutförd så sammanställdes resultatet och analyserades, vad som eftersträvades med analysen var att säkerställa att den information som angavs i intervjuerna kunde styrkas genom olika avhandlingar. När resultatet analyserats påbörjades rapportskrivningen.

I och med att arbetets huvudmetod är litteraturstudie och studie av teori, avviker redovisning av genomförande och resultat från KTH ABE-mallen. I kapitel 12 presenteras en överskådlig sammanställning av resultaten samt vart resultaten härstammar ifrån. Detta för att läsaren skall snabbt kunna ta del av vad resultaten av studien är. För en mer utförlig genomgång av resultaten och den teoretiska referensramen så hänvisas läsaren till de enskilda kapitlen. I kapitel 12 resultat, refereras de olika resultaten till korresponderande kapitel i rapporten.

2.2 Metod

2.2.1 Litteraturstudie

Litteraturstudie valdes då mycket information finns tillgängligt och många SHM-system finns beskrivna, hur de fungerar och hur de ska användas vid implementering.

I litteraturstudien användes olika vetenskapliga databaser så som Diva och ScienceDirect, samt KTH:s bibliotek för att få fram tidigare material om betongskador på broar, dess skademekanismer och om SHM-tekniken. Vidare hämtades information från ett antal doktorsavhandlingar, artiklar och tidigare examensarbeten.

För att komplettera kunskapen om SHM-tekniken utnyttjades olika leverantörers hemsidor och datablad om specifika sensorer. Flertalet leverantörer har instruktionsfilmer där deras teknik beskrivs, vilket har använts som kunskapskälla. Fördelarna med en litteraturstudie är att information kan inhämtas från många källor från flera olika länder. Information kan då jämföras med varandra för att se om källorna stämmer överens. Problem kan dock uppstå om information enbart hittas i en källa, den kan då inte styrkas genom undersökning av flera källor. Ett annat problem är om källorna säger emot varandra.

2.2.2 Intervjuer

På KTH och i byggbranschen finns många sakkunniga inom SHM och tillståndsbedömning. Intervjuer valdes för att ta del av deras kompetens och för att få svar på frågor angående SHM och tillståndsbedömning. Då studien genomfördes under 10 veckor så ansågs intervjuer vara den metod som fungerade bäst som utgångspunkt för att snabbt ge en orientering för vidare litteraturstudier. Öppna ostrukturerade intervjuer genomfördes med forskare inom SHM och skador på betongkonstruktioner samt sakkunniga inom tillståndsbedömning. Intervjuerna användes som utgångspunkt för vidare studier av vanligt förekommande skador och SHM-tekniker. Intervjuobjekt identifierades genom att söka i databasen Diva efter tidigare skrivna rapporter om SHM och skademekanismer på betongbroar. Ett flertal av dessa kontaktades för att undersöka intresse av att medverka i examensarbetet. Medarbetarna på det svenska forskningsinstitutet RISE var till stor hjälp för att identifiera intervjuobjekt samt hjälpte till med att förmedla kontakt. De som visade intresse av att medverka bokades för intervjuer. Genom undersökning av varje objekts kunskapsområde och enskilda intressen så kunde intervjufrågorna skraddarsys och utformas för varje objekt individuellt. Objekten gavs stort utrymme att själva utveckla intervjuens riktning och innehåll. Det ledde till att frågor uppstod under intervjuens gång, dessa tillkomna frågor fördes sedan in i den redovisade intervjun. Under intervjun fördes anteckningar. Anteckningarna renskrevs och de tillkomna frågorna fördes in och mailades till intervjuobjektet som då fick en möjlighet att ta del av den renskrivna intervjun och göra eventuella ändringar. När intervjuobjektet var klar med sin granskning så mailades anteckningarna tillbaka och det är dessa som är bifogade i bilaga A. Fördelar med intervjuer är att svar på specifika frågor snabbt kan inhämtas. Ett problem med intervjuer är dock att svaren blir personliga och att de kan vinklas utifrån intervjuobjektets erfarenheter och kanske inte ger en rättvis bild av verkligheten.

2.2.3 Fallstudier

Rapporten har identifierat fyra olika fallstudier som påvisar hur SHM-systemen kan användas vid detektering och övervakning av armeringskorrosion och sprickor i betong. Detta görs för att ge en tydlig bild på hur systemen kan användas samt visa vilka resultat som kan uppnås. Fördelar med fallstudier är att det går att visa riktiga fall där tekniken har använts. Problem som kan uppstå är att fall inte hittas eller är exakt utformade utifrån avgränsningarna.

3 Nulägesbeskrivning

Studien utförs i samarbete med RISE. På företaget arbetar både forskare och inspektörer för att få en heltäckande kunskapsbas inom betongkonstruktioner. RISE arbetar idag med tillståndsbedömning av betongkonstruktioner och utför traditionella inspektioner och använder sig av metoderna, okulär inspektion, oförstörande provning och förstörande provning. De bedriver bl.a. forskning inom livscykelanalyser (LCA) och livscykelkostnader (LCC). RISE söker alltid nya metoder för att förbättra arbetsmetodikerna och var intresserade av hur SHM kan användas som komplement vid tillståndsbedömning samt om SHM kan användas som ett verktyg vid LCA- och LCC studier. Studien ska ge en övergripande insikt i hur tillståndsbedömning av betongbroar går till idag, presentera vad SHM är samt visa ett fåtal SHM-system som kan användas som komplement vid detektering och övervakning av vanligt förekommande skador på betongbroar.

4 Tillståndsbedömning av broar

4.1 Inledning

Sveriges brobestånd inspekteras med kontinuerligt för att fastställa broarnas tillstånd, samt underhålls- och reparationsbehov. Inspektörer använder olika inspektionsmetoder för att avgöra broars tillstånd och sedan tilldela broarna tillståndsklasser. Brons tillstånd rapporteras in i förvaltningssystemet BaTMan, som behandlas i stycke 4.6. Dagens inspektioner utförs i första hand okulärt men kompletteras med hjälp av mer avancerade metoder, vilka är oförstörande- och förstörande provning (Fredèn & Olsson, 2012).

4.2 Skadedetektering, skadeövervakning och tillståndsbedömning

När en brokonstruktion inspekteras skiljer man på skadedetektering, skadeövervakning och tillståndsbedömning. Skadedetektering är att upptäcka skador som uppstått på konstruktionen. Skadorna är allt ifrån, kosmetiska defekter till fel på bärande element i konstruktionen. De individuella skadorna blir tilldelad en egen tillståndsklass. Klasserna benämns TK0-TK3 och beskriver hur omfattande skadan är. De olika tillståndsklasserna förklaras i stycke 4.5.

Skadeövervakning är att övervaka en existerande skada. Skadan dokumenteras vid vidare inspektioner där intresset är att se skadans utveckling, huruvida den förvärras eller förbättras.

När inspektionen är avklarad och alla skador är upptäckta samt tillståndsklassificerade, då utför broinspektören en tillståndsbedömning av brokonstruktionen i helhet och tilldelar bron en tillståndsklass TK0-TK3. Så genom att detektera och övervaka skador och uppskatta skadans omfattning så kan broinspektören utföra en tillståndsbedömning på hela brokonstruktionen.

4.3 Inspektionsmetoder

4.3.1 Okulär inspektion

Okulär inspektion är standardförfarandet vid de olika inspektionstyperna. Inspektören kontrollerar de olika brodelarna okulärt på en armlängds avstånd, ungefär en meter se Figur 4-1.



Figur 4-1 Visuell inspektion. Bild: Författarnas egna

4.3.2 Oförstörande provning

Oförstörande provning (OFP) syftar till en typ av analysteknik som används inom olika tekniska branscher för att granska egenskaperna hos ett material, en produkt eller en konstruktion. Precis som namnet återspeglar genomförs dessa tester utan att skada analysobjektet, vilket kan spara både pengar och tid. Nedan presenteras tre OFP metoder som används på broar.

Rapicor: Rapicor är en metod som används för att mäta och kartlägga armeringskorrosion i konstruktioner av betong. Rapicor instrumentet är ett handhållet instrument som inte behöver komplicerade inställningar eller överflödigt teknik. Allt som behövs för att implementera metoden är att ställa in täcksiktets tjocklek samt att ha tillräckligt med yta för att placera ut instrumenten (Lind & Wikslund, 2011).

Georadar: Georadar är en elektromagnetisk metod som framförallt används inom byggbranschen för att undersöka hur en konstruktion eller konstruktionsdel är armerad. Georadarn skickar ut radiovågor för att identifiera dielektriska skillnader i olika material. När man skickar ner radiovågor i armerad betong, resonerar vågorna olika bra i de olika materialen. På så sätt kan man identifiera var armeringsjärn är placerade i betongen (Nilsson & Gardner, 2017) se Figur 4-2.



Figur 4-2 Mätning med Georadar. Bild: Författarnas egna

Akustisk emission: Akustisk emission är en teknik som används både inom OFP och SHM. Akustisk emission behandlas vidare i kapitel 10

4.3.3 Förstörande provning

Förstörande provning (FP) är motsatsen till OFP och är en teknik som utsätter ett objekt för förstörelse av någon form. Förstörelsen genomförs för att samla information, t.ex. genom att borra i ett betongbjälklag för att bestämma armeringens dimension se Figur 4-3.



Figur 4-3 Förstörande provning. (Transportation, 2017)

4.4 Inspektionstyper

Huvudinspektion: En huvudinspektion fordrar mycket planering och är den grundligaste inspektionstypen. Den genomförs minst var sjätte år. Syftet är att upptäcka och bedöma skador som inom en 10 års period kan påverka brons funktion och trafiksäkerhet. Det är av intresse att identifiera skador som på sikt kan leda till förhöjda förvaltningskostnader (Pettersson & Hännestrand, 2017). Alla konstruktionselement som är åtkomliga och angränsande områden till bron så som slänter ska inspekteras okulärt på en armlängds avstånd vilket är ca en meters avstånd (Ansnaes, 2019). Enligt (Pettersson & Hännestrand, 2017) ställs det krav på att på att inspektören ska ha erfarenhet och kunskap inom:

- Akademisk utbildning. Personen ska vara utbildad ingenjör.
- Trafikverkets inspektionsmetodik. Inspektören ska antingen ha tillämpat metodiken praktisk under flera år eller ha utbildats teoretiskt.
- Användandet av aktuella mätmetoder.
- Erfarenhet kring mätning och bedömning av broars fysiska och funktionella tillstånd.
- Prognostisering av broars beständighet genom analys av skadeutvecklingar och nedbrytningsprocesser.
- Skadeåtgärder.

Det krävs ytterligare kunskaps- och erfarenhetskrav om den specifika konstruktionstypen som ska inspekteras. Ett exempel är för inspektion av en betong eller stålbro krävs det, kännedom om Trafikverkets regelverk samt aktuella betong- och stålbestämmelser (Pettersson & Hännestrand, 2017).

Särskild inspektion: När huvudinspektionen har genomförts beslutar inspektören om en särskild inspektion erfordras. På konstruktioner i anslutning till vatten tar inspektören ställning till om en särskild undervattensinspektion erfordras. Syftet med inspektionen är att mer utförligt undersöka de skador eller misstänkta skador som har identifierats under huvudinspektionen. Till exempel tätskiktets funktion (Lind & Wikslund, 2011). Det är under den särskilda inspektionen som användandet av oförstörande- och förstörande provning förekommer.

Inspektören som genomför den särskilda inspektionen ska ha samma kompetens som krävs vid en huvudinspektion. Samt inneha specialkompetens och erfarenhet inom de tester som genomförs.

Allmän inspektion: Allmän inspektion utförs mellan två huvudinspektioner och är en uppföljning av de skador som identifierats under huvudinspektionen men som inte åtgärdats än. Vid samma tillfälle utförs en mindre noggrann genomgång av konstruktionen i helhet. Om nya skador som kan påverka konstruktionens funktion eller trafiksäkerhet identifieras vid en allmän inspektion så dokumenteras dessa och registreras i förvaltningssystemet BaTMan. Mindre skador som t.ex. sprickor vilka inte påverkar konstruktionens funktion dokumenteras inte (Pettersson & Hännestrand, 2017). Personal som genomför allmän inspektion ska uppfylla kompetenskraven för huvudinspektion.

4.5 Tillståndsklasser

Vid broinspektioner så klassificeras de enskilda skadorna och brokonstruktionen som helhet. Trafikverket använder sig av fyra tillståndsklasser dessa är:

TK 0 = Bristfällig funktion bortom 10 år

TK 1 = Bristfällig funktion inom 10 år

TK 2 = Bristfällig funktion inom 3 år

TK 3 = Bristfällig funktion vid inspektionstillfället

4.6 Trafikverkets förvaltningssystem BaTMan

Bridge and Tunnel Management (BaTMan) är Trafikverkets förvaltningssystem för bro och tunnlar se Figur 4-4. Det bygger på det tidigare systemet SAFE BRO (Fredén & Olsson, 2012).

BaTMans uppgift är att effektivisera förvaltningen av den innefattande infrastrukturen på ett gynnsamt sätt med hänsyn till ekonomi, samhällsekonomi, säkerhet och miljö (Pettersson & Hännestrand, 2017).

BaTMan är ett webbaserat verktyg som ägs och förvaltas av Trafikverket. BaTMan används av konsulter och kommuner. I förvaltningssystemet finns över 30 000 av Sveriges broar registrerade där information om skador, reparationer, tidigare inspektioner, brons specifikationer, ritningar och tekniska uppgifter mm. finns lagrade (Pettersson & Hännestrand, 2017).

The screenshot displays the BaTMan web application interface. The main content area is titled 'Sammanställning - Konstruktion' and shows details for a bridge with ID '20-633-1'. The bridge name is 'Bro över Säknäsån vid Östomsjön'. Key details include:

- Konstruktion:** Funktionstyp: Vägbro; Belägenhet: Allmän väg; Nybyggnadsår: 1956; Ersätter konstruktion: (blank).
- Tillhörighet:** Ägare: VV-Region Mitt; Ägare anmärkning: VV-Region Mitt; Förvaltare: W1 Älvdalen (2002-10-01 till 2009-08-); Driftområde: Dalarnas län; Län: Älvdalen; Kommun: Älvdalen.
- Geografiska områden:** Typ: (blank); Område: (blank).
- Övergripande tekniska uppgifter:**

Konstruktionslängd	143 m
Konstruktionsyta	686 m ²
Broyta	572 m ²
- Konstruktiv indelning:**

Tvårsystem Nr	Bredd m	Längdsystem Nr	Konstruktionstyp	Material	Spännvidder m
1	4,0	1	Balkbro fritt upplagd	Betong armerad	12,5
		2	Balkbro överliggande båge	Såll med broboreplatta i betong	12,7
		3	Balkbro fritt upplagd	Betong armerad	13

 An inset window titled 'Vy bilder' shows a photograph of the bridge, a concrete arch bridge over a river. The interface also includes a navigation menu on the left with categories like 'Sammanställning', 'Ritningar', 'Allmänt', 'Tekniska uppgifter', 'Sätningar', 'Passager', 'Bänghet', 'Inspektion', 'Planering', 'Utfärds åtgärder', 'Uppföljning', 'Sök dokument', and 'Ladda ned fakta'.

Figur 4-4 Trafikverkets Förvaltningssystem BaTMan (SAFI, 2014)

5 Betongkonstruktioners skador och dess skademekanismer

5.1 Inledning

Alla betongkonstruktioner brytas med tiden ner av miljön. Hur snabbt nedbrytningen sker beror på hur den är konstruerad och hur aggressiv den omgivande miljön är. Betongbroar som befinner sig i vägmiljö är hårt utsatta, då de exponeras för tösalt, stora mängder vatten och stora temperaturförändringar.

Det finns en korrelation mellan broars produktionsår och broskador. Både i skadetyper och hur frekvent de uppstår. På de broar som är byggda under 1940-talet och finns kvar idag ser man ofta att de är i bra skick. Det beror på att dåtidens konstruktörer inte tänkte på att spara in på resurser utan konstruerade broarna för att hålla en lång tid. Under 1960–1970-talet i samband med miljonprojektet utvecklades mer av en slit och släng mentalitet hos beställare och konstruktörer. Broarna skulle byggas snabbt eftersom Sverige hade ett stort behov av infrastruktur, men samtidigt skulle kostnaderna vara så låga som möjligt. Detta ledde till att det byggdes broar med lägre kvalitet som idag är i stort behov av underhåll och reparation. Vartefter förbättrades byggnormerna, broar byggda på 1980-talet och framåt har i allmänhet hög standard. Dessa broar påvisar inte skador i lika stor utsträckning som föregående decennier (Silfwerbrand, 2019).

De skador som är vanligast på betongbroar är armeringskorrosion och sprickor i betong. Vilka skador som uppstår och vilka brodelar som skadas beror till stor del på i vilken miljö bron befinner sig. I vägmiljö är stöd och kantbalkar speciellt utsatta. Detta är till stor del till följd av tösalt (Silfwerbrand, 2019). M., Pettersson och S., Hännestrand i (Pettersson & Hännestrand, 2017) lyfter också fram sprickor i betongen som vanligt förekommande på betongbroar.

När man bygger och underhåller en betongbro är det viktigt att känna till de nedbrytningsmekanismer som på sikt kan skada konstruktionen. Nedan presenteras skador och skademekanismer som är av intresse gällande betongbroar.

5.2 Skador på betongkonstruktioner

5.2.1 Sprickor i betong

Det är både naturligt och oundvikligt för betongkonstruktioner i armerad betong eller spännbetong att spricka. När gränstojningen i en betong överstigs spricker den. Det sker olika snabbt och till varierande grad.

Sprickor till följd av laster

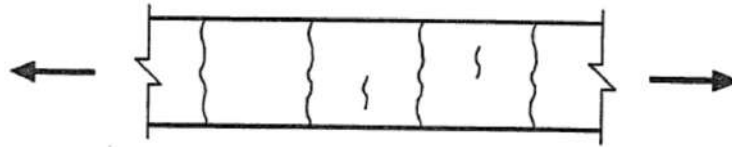
Enligt (Aronsson, o.a., 1993) kategoriserar man sprickor till följd av laster till fyra huvudtyper, böjsprickor, dragsprickor, skjvsprickor och böjskjuvsprickor.

Böjsprickor Figur 5-1: När böjande momentet i betongen överskrider böjdraghållfastheten uppstår böjsprickor. Belastning från trafik är det vanligaste skälet till böjsprickor.



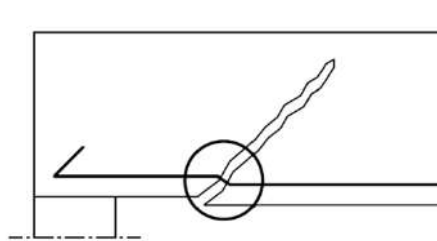
Figur 5-1 Böjsprickor (Aronsson & Larsson, 2007)

Dragsprickor Figur 5-2: När betongens draghållfasthet överskrids bildas dragsprickor. De vanligaste orsakerna till dragsprickor är krympning, sättning och temperaturförändringar.



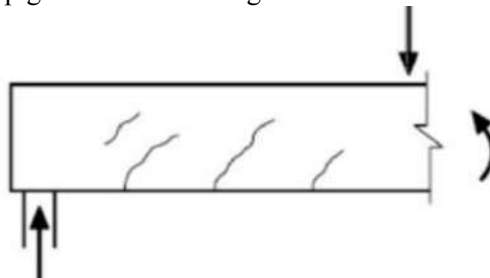
Figur 5-2 Dragsprickor (Aronsson & Larsson, 2007)

Skjuvsprickor Figur 5-3: Skjuvsprickor uppkommer pga. tvärkrafter och i vissa fall vridande moment när betongens draghållfasthet överskrids. Sprickorna känns igen då de oftast är sneda i 45° och återfinns ofta vid upplag, sektionförändringar eller där armeringsmängden varierar. Skjuvsprickor anses vara extra allvarliga och en brokonstruktion tilldelas TK3 bara skjuvsprickor existerar (Ansnaes, 2019).



Figur 5-3 Skjuvspricka (Pettersson F. , 2014)

Böjskjuvsprickor Figur 5-4: Böjskjuvsprickor uppkommer av en kombination av antingen böjande moment och tvärkraft eller böjande moment och vridande moment. Böjskjuvsprickor uppstår ur rena böjsprickor som förgrenar sig ut p.g.a. ökad belastning.



Figur 5-4 Böjskjuvsprickor (Aronsson & Larsson, 2007)

Sprickor orsakad av miljöpåverkan

Sprickor i betong kan uppstå från miljöpåverkan. De vanligaste orsakerna till att betong spricker pga. miljöpåverkan är; frostsprängning och saltfrostsprängning (Fagerlund, 1992).

Frostsprängning: Frostsprängning kan leda till djupgående grova sprickor som är sammankopplade med varandra i nätstrukturer se Figur 5-6. I andra fall kan spjälkning uppstå se Figur 5-5. Då spricker betongen loss i sjok och skiktas, något som ofta leder till att armeringsjärnen friläggs (Fagerlund, 1992).



Figur 5-5 Spjälkning av stödmur (Ansnaes, 2019)



Figur 5-6 Spricka orsakad av frostangrepp (Inc, 2019)

Saltfrostsprängning: Skadorna vid saltfrostsprängning är ofta annorlunda än frostsprängning av rent vatten. Skadorna är oftast ytliga, i form av gradvis sprickbildning och avskalning av betongens ytskikt se Figur 5-7. I vissa fall kan större bitar så som ballastkorn lossna (Fagerlund, 1992).



Figur 5-7 Avskalning orsakad av saltfrostangrepp (Lindegård & Markungar, 2014)

5.2.2 Skador orsakad av armeringskorrosion

Under de senaste årtiondena har det iakttagits växande mängd korrosionsskador på betongkonstruktioner både i Sverige och utomlands. Armeringskorrosion leder till framför allt två typer av negativa effekter: reducerad armerings area och sprickbildning orsakad av korrosion (Byfors & Tuutti, 1994).

Reducerad armeringsarea: När armeringsjärn rostar så reduceras järnets tvärsnittsarea vilket leder till minskad lastupptagningsförmåga. Något som kan leda till funktionsproblem för konstruktionen.

Sprickbildning orsakad av korrosion: När armeringsjärn rostar ökar järnets volym och betongen utsätts för inre krafter som kan leda till sprickbildning och spjälkning se Figur 5-8.



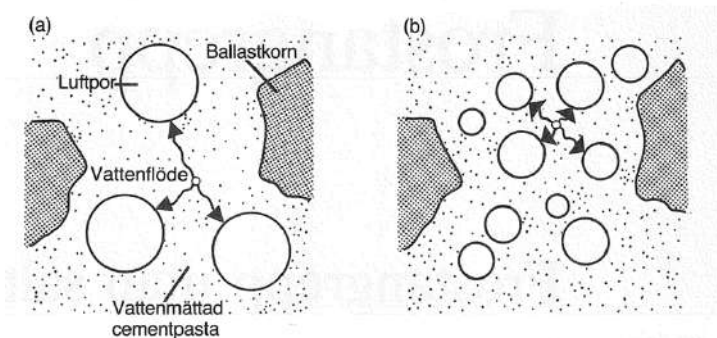
Figur 5-8 Armeringskorrosion (Ri.se, 2019)

5.3 Skademekanismer

5.3.1 Frostangrepp

Betong som har härdat har en porositet på 12–18 volymprocent (Fagerlund, 1992). Majoriteten av dessa porer består av gel- och kapillärporer. När betong exponeras för nederbörd suger den åt sig vatten som fyller porerna. Vid utomhusanvändning utsätts betongen för minusgrader och det vatten som har samlats i porerna fryser till is. Is har 9% större volym än vatten, så om porerna i stor utsträckning är vattenfyllda och vattnet börjar frysa, finns det ingenstans för vattnet att emigrera. Vattnet expanderar då i varje enskild por och betongen utsätts för stora inre tryck. I extrema fall kan det leda till att betongen spricker (Fagerlund, 1992).

Genom att tillsätta luftporbildande medel i betongen kan man få en porstruktur som har fler mindre porer som sitter närmare varandra se Figur 5-9. Det gör att transportsträckan för vattnet blir kortare och trycket utjämnas därför enklare (Fagerlund, 1992).



Figur 5-9 Porstrukturer i betong (Fagerlund, 1992)

- (a) Porstruktur utan luftporbildande medel
- (b) Porstruktur med luftporbildande medel

5.3.2 Saltfrostangrepp

Frostangrepp från vatten innehållande tösalt eller havsvatten ter sig ofta lite annorlunda än frostangrepp från rent vatten. Saltfrostangrepp påverkar nästan uteslutet betongens ytskikt genom avflagnings. I extrema fall kan större partiklar såsom ballastkorn lossna och exponera konstruktionens armering. Vilket kan leda till ytterligare angrepp på konstruktionen såsom armeringskorrosion (Lindegård & Markungar, 2014).

Det är fortfarande inte fastslaget vilken skademekanism som får vatten med salter att påverka betongen annorlunda än rent vatten (Fagerlund, 1992).

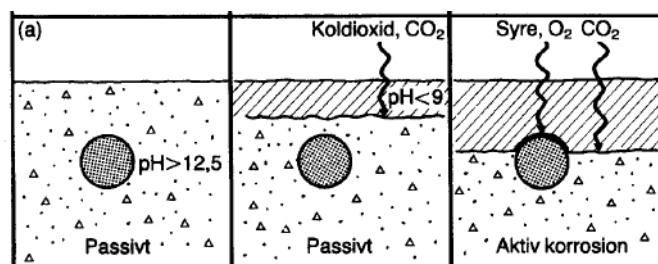
5.3.3 Armeringskorrosion föranlett av karbonatisering och kloridinträngning

Armeringskorrosion syftar till den kemiska reaktion som uppstår på armering i betongkonstruktioner, även kallat rost. Som tidigare nämnts i stycke 5.2.2 resulterar korrosion i två negativa effekter. Dels minskar armeringsjärnets tvärsnittsarea när järnet rostar. Rost har betydligt större volym än järn, vilket skapar tryck mellan betong och armeringsjärn som kan leda till att betongen spricker (Fagerlund, 1992).

För att korrosion ska uppstå krävs att tre villkor uppfylls. Det kräver fukt och syre i anslutning till järnet, och att järnet depassiveras. I betongkonstruktioner depassiveras järnen i huvudsak på två sätt. Antingen via kloridinträngning eller karbonatisering (Fagerlund, 1992).

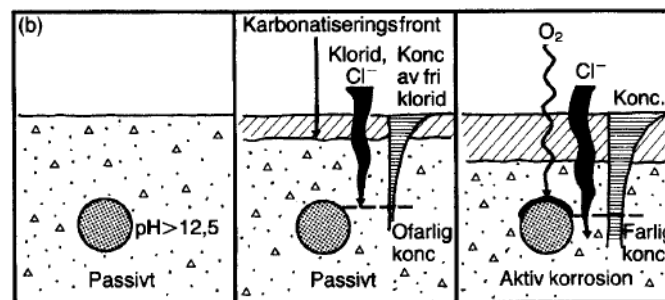
Karbonatisering syftar till förorenad luft innehållande koldioxid som kommer i kontakt med betong och börjar tränga sig in. Koldioxiden reagerar kemiskt med ämnen i materialet vilket leder till att PH-värdet sänks kraftigt. Karbonatiseringen sker förhållandevis jämt över konstruktionen. Dock kan inhomogenitet och ytskador på betongen påskynda processen lokalt.

När karbonatiseringsfronten når fram till armeringen se Figur 5-10, sänks det lokala PH-värdet och järnen depassiveras. Då uppfylls villkoren för korrosion och det börjar rosta (Fagerlund, 1992).



Figur 5-10 Armeringskorrosion på grund av karbonatisering (Lindegård & Markungar, 2014)

Kloridinträngning förekommer främst i miljöer som exponeras för havsvatten eller lös salt. Klorider tränger in i betongens yta via en vattenlösning. Till skillnad från karbonatisering sker kloridangreppet ofta lokalt. När kloridangreppet når in till armeringen och antalet fria kloridjoner överstiger ett tröskelvärde startar korrosion (Fagerlund, 1992) se Figur 5-11.



Figur 5-11 Armeringskorrosion på grund av kloridinträngning (Lindegård & Markungar, 2014)

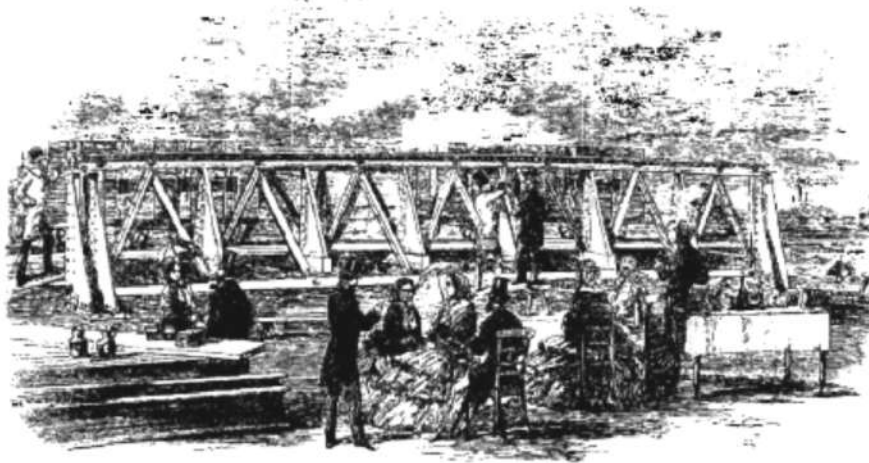
5.3.4 Sulfatangrepp

Den typ av saltangrepp som är mest skadlig är sulfatangrepp. Sulfatjoner förekommer främst i marken och grundvatten men kan även förekomma i avlopps och havsvatten. Utomlands har sulfatangrepp varit ett stort problem, men i Sverige är sulfatangrepp inte vanligt då sulfathalten i mark och grundvatten sällan uppnår tillräckligt hög nivå för att vara skadligt för betongkonstruktioner (Rombèn, 1997).

6 Structural Health Monitoring

6.1 Inledning

Intresset för SHM och dess tillämpning på infrastruktur har ökat i samband med både forskning och utförda fallstudier. Ändå kan dess grund och motivation spåras till mänsklighetens allra första ansträngningar för att visualisera, konstruera, oroa sig för försämring av konstruktionen och sedan försöka reparera eller på annat sätt förlänga livet av en konstruktion se Figur 6-1. Detta beror till stor del av det faktum att alla konstruktioner försämras över tid, det är viktigt att ägaren/operatören har en bra uppfattning om omfattningen av försämringen samt försämringens effekt på konstruktionens återstående livslängd och kapacitet. Det är viktigt vid underhållsplanering, att ha tillräcklig information för att göra ett välinformerat beslut om underhåll- och reparationsåtgärder.



Figur 6-1 Testning av ett fackverk utfört i stål tidigt 1900-tal (Hejll, 2007)

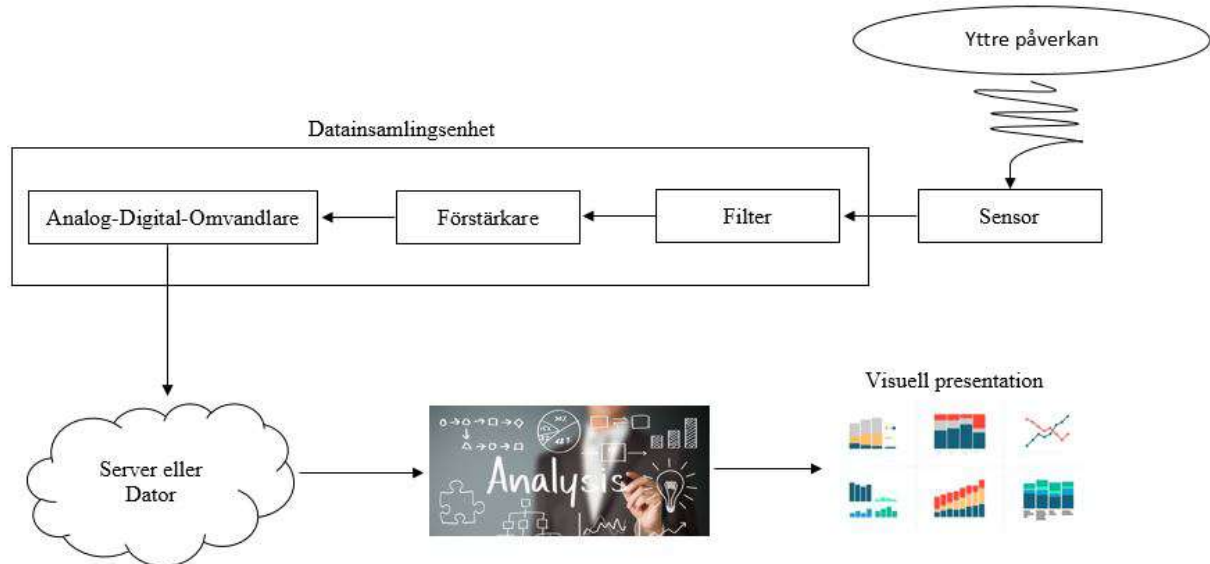
SHM siktar mot att vid varje moment av en konstruktions livstid utföra automatiserad tillståndsbedömning av strukturen i helhet. Det innefattar även en tillståndsbedömning av konstruktionens olika komponenter och material. Ett fullt utvecklat SHM-system ska ge förslag på optimala underhåll- och reparationsåtgärder. För att bedöma hur utvecklat ett SHM-system är anger Comisu, Taranu, Boaca & Scutaru (2017) fem nivåer.

- Nivå 1 – Upptäck av skada i konstruktionen. Systemet känner av att en skada har uppstått.
- Nivå 2 – Lokalisering av skada. Systemet lokaliserar i vilken del av konstruktionen skadan uppstått.
- Nivå 3 – Skadeidentifiering. Systemet identifierar vilken typ av skada som har uppstått.
- Nivå 4 – Uppskattning av skada. Systemet uppskattar omfattningen av skadan.
- Nivå 5 – Skadeanalys. Systemet uppskattar omfattningen av skadan och utvärderar konstruktionens kvarvarande livstid samt föreslår åtgärdsplan.

Tekniken är fortfarande ung och inte fullt utvecklad, därför krävs fortsatt forskning för att kunna utföra automatisk tillståndsbedömning. Idag används tekniken mer som ett komplement vid traditionella inspektioner för att få en bättre förståelse för konstruktionens verkningssätt och de faktiska lasteffekterna (Leander, 2019).

Den generella principen för hur ett SHM-system beskrivs nedan och se Figur 6-2 för en generell skiss:

1. Sensorerna uppfattar en påverkan som omvandlas till en låg analog elektrisk signal.
2. Brus i den analoga elektriska signalen reduceras i ett filter.
3. Signalen förstärks i en förstärkare för att förbättra signal-brusförhållandet
4. Signalen skickas till en analog-digital-omformare (ADO), antingen med kabel eller trådlöst.
5. I ADO omvandlas signalen från analog form till digital form som kan behandlas av en server eller dator.
6. Data i den digitala signalen lagras på en server eller dator för vidare analys och presentation.



Figur 6-2 Generell princip för ett SHM-system

6.2 Skadedetektering, skadeövervakning och tillståndsbedömning med SHM

Vid användning av SHM är det viktigt att göra en skillnad mellan skadedetektering, skadeövervakning och tillståndsbedömning med hjälp av SHM. Skadedetektering och skadeövervakning med hjälp av SHM är väl utvecklat och används på många projekt i Sverige och i världen. De olika sensorerna kan antingen vara inbäddade i konstruktionen eller monteras på utsidan. Det finns flera olika sensorsystem som kan användas vid detektering av skador eller för övervakning av en utvecklad skada (Leander, 2019).

Tillståndsbedömning med hjälp av SHM skiljer sig från detektering och övervakning. Det sker genom att samla in data från sensorer som är inbäddade i konstruktionen eller monterade på utsidan. För att sedan låta SHM systemet automatiskt utföra en tillståndsbedömning av en skada eller hela brokonstruktionen. Så väl utvecklade SHM system finns inte idag (Leander, 2019). Det pågår forskning där man försöker utveckla SHM-system som automatiskt kan utföra tillståndsbedömning. Ett exempel är det internationella forskningsprojektet COST TU1402 "Quantifying the value of structural health monitoring" projektets mål var att visa på nyttan med mätningar och ge beslutsfattare verktyg för att kunna utvärdera när mätningar är fördelaktiga. COST är en europeisk samarbetsorganisation vars syfte är att tillhandahålla nätverksmöjligheter för forskare och innovatörer för att stärka Europas kapacitet att ta itu med vetenskapliga, tekniska och samhällsliga utmaningar (COST, u.å). Det bedrivs även forskning vid KTH för att kunna automatisera tillståndsbedömningen av konstruktioner med SHM (Leander, 2019).

6.3 Lokal eller Global mätning av konstruktioner

Vid användning av SHM finns två sorters konstruktionstekniska mätningar, dessa är lokala och globala mätningar. Lokal mätning är den vanligaste typen av mätning och används för att upptäcka skador och övervaka dem eller för att övervaka kritiska områden t.ex. lager och infästningar. Utrustas en brokonstruktion med många lokala mätpunkter ses mätningen fortfarande som lokal. Det är för att en global mätning kräver att andra parametrar eller metoder används för att ge information om konstruktionen i helhet (Hejll & Täljsten, 2005). Som exempel på global mätning lyfter Hejll, A., och Täljsten, B. (2005) fram nedböjning. Om nedböjningen på en bro ökar utan att varken laster eller temperatur förändras så är det en indikation på att en skada uppstått vid stöd eller att brokonstruktionens styvhet har minskat. Hejll, A., & Täljsten, B. (2005) säger att nedböjning är svårt att mäta då det är svårt att hitta en pålitlig referenspunkt att mäta från. Därför används mätning av nedböjning relativt sällan i SHM speciellt när det gäller långtidsmätningar.

6.4 Lagring av mätdata

Vid övervakning av en brokonstruktion vare sig intresset är att övervaka existerande skador eller konstruktionen i helhet utförs de flesta mätningarna över en längre period. Traditionellt har man sparat all data som SHM systemet har genererat och det resulterar i stora mängder data som ska lagras och analyseras. Enligt M., Enckell (Enckell, 2011) handlar det om terabyte av data som genereras och ska lagras samt analyseras.

R., Karoumi säger i (Karoumi, 2019) att det skapar problem att lagra all genererade data. Dels för att så stora mängder data tar plats på lagringsenheterna men framför allt för att analyseringen av sådan datamängd blir komplicerad. Därför föreslår R., Karoumi periodisk mätning. Vid periodisk mätning så utförs mätningar över ett tidsintervall, vanligtvis 10 minuter. Om inget ovanligt har registrerats under tidsintervallet så sparas enbart det beräknade max-, min- och medelvärde samt standardavvikelsen för den uppmätta storheten, all annan insamlade data raderas. Om systemet mäter värden som överstiger de definierade gränsvärdena för den aktuella storheten, då sparas hela mätserien för vidare analys. Detta säger R., Karoumi resulterar i en mer överskådlig datamängd som är enklare att analysera.

7 Mätutrustning

7.1.1 Sensorer

Inom byggtekniken finns sex stycken fysiska enheter, de är: mekanisk, termisk, elektrisk, magnetisk, kemisk och strålning. Apparatur som omvandlar en fysikalisk enhet till en annan kallas för en omvandlare. En omvandlare som förändrar en fysisk enhet till en elektrisk signal benämns som en sensor. En typ av sensor är, accelerometer som omvandlar mekanisk acceleration till volt och kategoriseras därför som en sensor. En termograf däremot som omvandlar temperatur till förskjutning är inte en sensor, då den omvandlar termisk enhet till mekanisk enhet (Hejll & Täljsten, 2005).

7.1.2 Dataöverföring

Anläggningar som övervakas och mäts är ofta stora. Sensorerna placeras därför på en stor yta med långa avstånd mellan varandra och till datainsamlingsenheten. Hur dataöverföringen hanteras är därför viktigt då bristfällig utformning av SHM-systemet kan leda till förlust eller förvrängning av data. Överföring av data sker analogt i volt, digitalt som datapaket eller via antenner som elektromagnetiska vågor. Gemensamt för alla överföringstyper är att signalerna filtreras, förstärks och omvandlas vilket kallas för signalöverbrygning. Den kablade överföringen kan t.ex. utföras med vanliga kopparledningar eller med fiberoptiska kablar läs stycke 9.2 (Hejll & Täljsten, 2005). Idag används trådlös dataöverföring i stor utsträckning. Framför allt mellan datainsamlingsenheten och den dator eller server som data samlas på.

7.1.3 Signalöverbrygning

Elektriska signaler från sensorer kallas primära elektriska signaler. De primära signalerna innehåller mycket brus och är dåligt anpassade för överföring, förstärkning, modifikation, och registrering. Därför används signalöverbryggare för att göra de primära signalerna mer lätthanterliga för datainsamlingsenheten.

Filter: Första steget i signalöverbrygning är ett filter. Filter används för att exkludera frekvenser som försämrar signalkvaliteten, ett exempel är brus som filtreras bort i analoga filter innan signalen skickas vidare till ADO.

Förstärkare: Förstärkare är apparater som finns i de flesta SHM-systemen. Huvudfunktionerna för en förstärkare är att öka signaler och minska bruset det s.k. signal-brusförhållandet, samt att öka upplösningen på signalen. De primära elektriska signaler som kommer från sensorer är ofta lågnivå signaler. Eftersom avståndet mellan datainsamlingsenheten och sensorerna normalt är stort, så störs signalen ofta av elektriskt brus. Om signalerna förstärks efter att de har överförts en längre sträcka förstärks bruset motsvarande mycket. Förstärkningen bör istället ske innan överföringen då den ännu inte har påverkats av brus, och på så sätt blir signal-brusförhållandet bättre.

ADO: Dagens datainsamlingsenheter kan enbart registrera och lagra data i digital form. Som beskrivs i 7.1.1 är sensorernas signaler analoga. En ADO gör om dessa analoga signaler till digital binär form så att de ska passa datainsamlingsenheten. ADO kan bara hantera insignaler i specifika amplituder, därför måste signalen först gå genom en förstärkare som förhöjer det till rätt nivå.

Datainsamlingsenhet

SHM-system använder sig av många sensorer. Alla sensorer skickar individuella signaler som måste gå genom de olika signalöverbryggningskomponenterna. Därför kopplas flera sensorer till en datainsamlingsenhet som innehåller alla signalöverbryggningskomponenterna.

8 Traditionella sensorer typer

8.1 Inledning

SHM har implementerats på många projekt och utvecklingen av sensortekniken har skett gradvis. Vissa sensorer har en längre tradition av användning än andra, i detta kapitel presenteras traditionella sensorer övergripligt. Då många av de traditionella sensorerna är baserade på samma fenomen, piezoelektricitet och piezoresistiv så inleds kapitlet med en kortfattad förklaring av dessa två fenomen innan varje enskild sensor presenteras.

8.2 Piezoelektricitet och Piezoresistiv

Piezoelektricitet: är en sammansättning av orden piezo som betyder trycka/pressa och elektricitet. Piezoelektricitet är en egenskap hos vissa kristaller där kristallerna genererar elektricitet vid deformation. Det beror på att kristallerna saknar symmetri centrum då de positiva och negativa laddningarna är separerade men symmetriskt distribuerade så att kristallen är neutralt laddad. Vid deformation av materialet så upphör symmetrin och det uppstår en ny laddningssymmetri som genererar en spänning. Det existerar ungefär 20 naturligt förekommande kristaller med piezoelektriska egenskaper.

Piezoresistiv: är en sammansättning av orden piezo och resistans och är en materialegenskap. Vid deformation så ändrar materialet sin resistans. Alla ledare av elektrisk spänning förändrar sin resistans till viss del när de utsätts för mekanisk påverkan men piezoresistiva har en betydligt större resistansförändring än t.ex. en ledare i koppar och detta fenomen utnyttjas i piezoresistiva sensorer. De flesta piezoresistiva materialen är halvledare och ett exempel är kisel.

8.3 Accelerometrar

Accelerometrar används för att mäta vibrationer och snabba rörelser i konstruktioner. En accelerometer kan vara piezoelektrisk eller piezoresistiv.

Det tillverkas tre olika typer av piezoelektriska accelerometrar, de olika accelerometrarna kan mäta skjuvning, tryck och töjning, som i sin tur omvandlas till en elektrisk spänning. En piezoelektrisk accelerometer består av en massa som är en piezoelektrisk kristall, en bas för att fästa sensorn på konstruktionen och ett skyddshölje för att skydda sensorn från omgivande miljö.

Piezoresistiva sensorer tillverkas som diskreta belastningsmätare, de fästs mekaniskt på konstruktionen och är elektriskt anslutna i en Wheatstone brygga för att producera en elektrisk signal proportionell mot vibrationer i konstruktionen. En extern elektrisk källa ansluts till de piezoresistiva accelerometrarna för att skapa en spänning i sensorn.

8.4 Trådtöjningsgivare

En trådtöjningsgivare mäter töjning och den grundläggande principen för trådtöjningsgivare är att en metalltråd ändrar sin elektriska resistans som ett resultat av förändring av dess längd eller tvärsnitt. Alla trådtöjningsgivare har en givarfaktor som beskriver sensorns känslighet. Givarfaktorn är känslig för temperaturändringar vilket resulterar i att en folietöjningsgivare tillverkad i ett specifikt material kommer att uppleva en förändring av sin resistans till följd av temperaturändringar. Detta är något man måste beakta vid tillverkning av trådtöjningsgivare. Då detta är ett känt fenomen är de flesta trådtöjningsgivare temperaturkompenserade från fabrik. Vid små töjningar förblir givarfaktorn konstant så att motståndet förblir proportionellt mot töjningen.

Trådtöjningsgivare som finns tillgängliga idag har hög tolerans, känslighet, mångsidiga, lätta att använda och installera, relativt billiga och finns i många olika utföranden (Enckell, 2011).

Angöringsytorna måste vara noggrant rengjorda och trådtöjningsgivaren monteras med lämpliga tekniker på ytan.

8.5 Lutningsmätare

Lutningsmätare används för att känna av lutningen på ett objekt med avseende på tyngdkraftens riktning. Vid övervakning av brokonstruktioner är det t.ex. lutningen på bropelare, stöd eller pyloner som är av intresse. En lutningsmätare kan baseras på en mängd olika tekniker så som flytande kapacitet, elektrolytisk, gasbubbla i vätska och pendel.

En lutningsmätare är kapabel att mäta lutningen i två axlar, för att kunna mäta i tre axlar så krävs installation av en extra lutningsmätare.

8.6 Linear Variable Differential Transformers

Linear Variable Differential Transformers (LVDT) som på svenska kan översättas till linjärt varierande nedböjningsomvandlare (Hejll & Täljsten, 2005) är en förskjutningssensor och har använts på många projekt för att övervaka sprickor i betongkonstruktioner. När ström, som kan vara både växel- och likström, leds genom den primära spolen skapas en spänning i de sekundära spolarna. Den magnetiska kärnan är mekaniskt monterad på konstruktionen och konstruktionens rörelser påverkar den magnetiska kärnans position. Därmed ändras storleken på den utgående spänningen från de sekundära spolarna. Spänningen översätts till förskjutning i en datainsamlingsenhet och absoluta mått erhålls.

8.7 MEMS sensorer

MEMS står för Micro-Electro-Mechanical Systems och tillverkas genom mikrofabrikation.

Mikrofabrikation är en process för att skapa miniatyrstrukturer i mikrometerskala eller mindre. MEMS sensorer kan tillverkas från, relativt enkla komponenter utan rörliga delar till väldigt komplexa komponenter med flera rörliga delar.

Det viktigaste kriteriet för MEMS är att det finns vissa element som har någon form av mekanisk funktion vare sig dessa element är rörliga eller inte.

MEMS används inom många olika fält och kan vara tillverkade som ställdon, miniatyriserade strukturer eller som sensorer. MEMS är således en tillverkningsmetod och MEMS sensorer kan vara accelerometrar, lutningsmätare, trådtöjningsgivare, gyroskop, temperaturmätare mm. MEMS kan vara piezoelektriska och piezoresistiva.

9 Fiberoptiska SHM-system

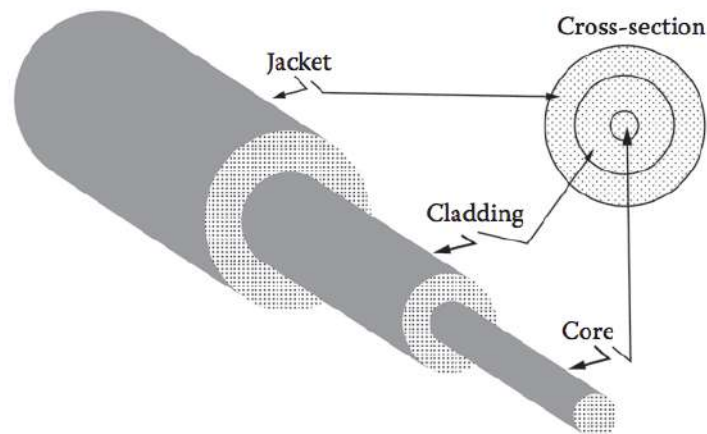
9.1 Inledning

Användningen av fiberoptiken har idag spridit sig till många olika fält. I det här kapitlet beskrivs vad en fiberoptisk kabel är och vad den kan användas till. Kapitlet ger en insikt om några fält där fiberoptiken utnyttjas innan en utförlig beskrivning av fiberoptiska sensorer ges. I slutet av kapitlet finns två olika fiberoptiska system beskrivna som kan användas för detektering av nya sprickor eller övervakning av existerande sprickor i en betongkonstruktion. Det presenteras sedan två fallstudier som visar hur systemen kan användas.

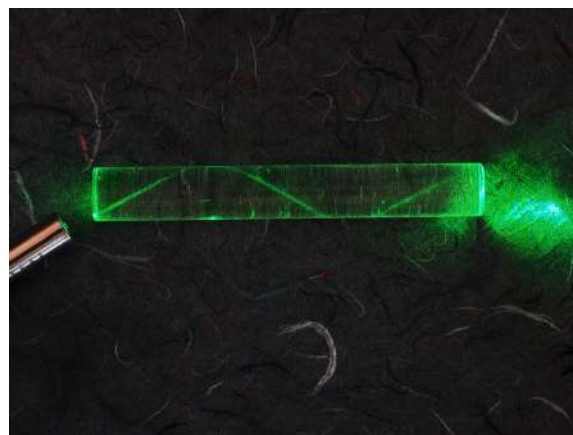
9.2 Fiberoptiska kablar

Fiberoptiska kablar började utvecklas efter upptäckten av lasern. Forskarna hade lärt sig hur man sänder information med hjälp av laser.

Fiberoptiska kablar består av en transparent cylindrisk fiberkärna ("Core") som används för att sända ljus. Kärnan är oftast tillverkad av silikatglas (sodaglas) med hög renhet, men kan vara tillverkad av plast så kallade Plastic Optical Fibers (POF) (Enckell, 2011). Kärnan omges av en mantel ("Cladding") med lägre reflektionsindex. Skillnaden i reflektionsindex skapar en spegelliknande yta som reflekterar tillbaka ljuset in mot kärnan och guidar ljuset igenom kabeln enligt totalreflektionsprincipen se Figur 9-2. Skalet omges i sin tur av ett plastskyddshölje ("Jacket") i polyvinylklorid (PVC) som skyddar fiberkabeln från mekanisk åverkan se Figur 9-1 (Al-Azzawi, 2017).



Figur 9-1 Schematisk bild av en fiberoptisk kabel (Al-Azzawi, 2017)



Figur 9-2 Totalreflektion i en enkel optisk fiber (Timwether, 2008)

Glas används mest i optiska fibrer men plast är ett lättare och billigare material, enklare att hantera och är mer flexibelt. Optiska fibrer av plast har dock en högre förlust än de av glas (Hejll & Täljsten, 2005). I Tabell 9-1 redovisas mått på kärnan, mantel och skyddshölje för fyra vanligt förekommande fiberkablar. Olika tvärsnitt och diametrar förekommer för specialiserade fiberoptiska kablar, men de behandlas inte i detta arbete.

Tabell 9-1 Standardiserade diametrar på fiberkablar (Al-Azzawi, 2017)

Standardiserade diametrar på fiber kablar		
Kärnan (µm)	Mantel (µm)	Skyddshöljet (µm)
8	125	250
50	125	250
62.5	125	250
100	140	250

Fiberoptiska kablar tillverkas och anpassas för olika miljöer. Kablar tillverkas för att användas inomhus eller utomhus. Det finns hybridkablar som kan användas både utomhus och inomhus. Fiberoptiska kablar utförs som singelmodfiber (SMF) och multi modfiber (MMF). I en SMF färdas enbart en mod som kallas för grundmoden och i MMF färdas flera moder samtidigt. Kärnan i en SMF är mindre i diametern än vad kärnan är i en MMF. Då enbart en mod färdas i SMF så signalförsvagningen och minskar antal reflektioner. Det gör att ljussignalerna i en SMF kan färdas över längre avstånd än MMF (Hejll & Täljsten, 2005).

9.3 Andra användningsområden för fiberoptiska kablar än sensorer

Telekommunikationen: Telekommunikation är troligen det användningsområdet för fiberoptiska kablar som är mest känt för gemene man. Kablarna används för att skicka stora kvantiteter data över långa avstånd. Fiberoptiken används för bredbandsuppkoppling och kabel TV. Företag använder tekniken för att skicka bild och ljus till slutanvändaren.

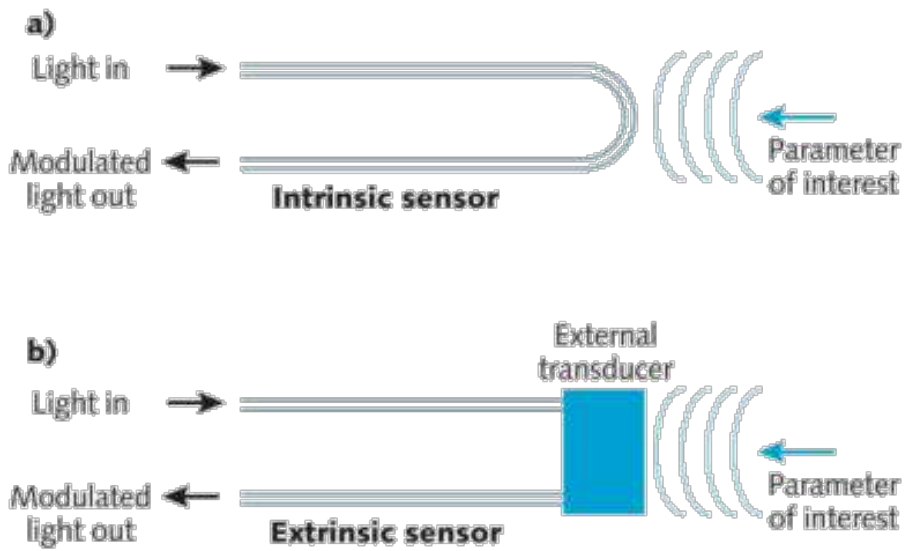
Belysning: Fiberoptiska kablar används för att belysa olika miljöer. De används i kommersiella fastigheter, privata bostäder och i offentliga miljöer. Kablarna används som ljusbärare av olika våglängder, det gör att man kan alternera färgerna i slutprodukten.

Sjukvård: Optiska fibrer används inom sjukvården vid tithålsoperationer samt vid endoskopi. Kablarna kan användas vid behandling av cancertumörer, forskning bedrivs inom detta område av Knut och Alice Wallenbergs stiftelse och mer information finns på deras hemsida.

9.4 Fiberoptiska sensorer

Mätningar med fiberoptiska sensorer kan vara antingen lokala och då fokuserade på materialets beteende eller globala och då fokuserande på konstruktionens beteende i helhet. Den fiberoptiska sensortekniken erbjuder en stor mängd olika typer av sensorer beroende på om mätningarna ska utföras över korta- eller långa avstånd.

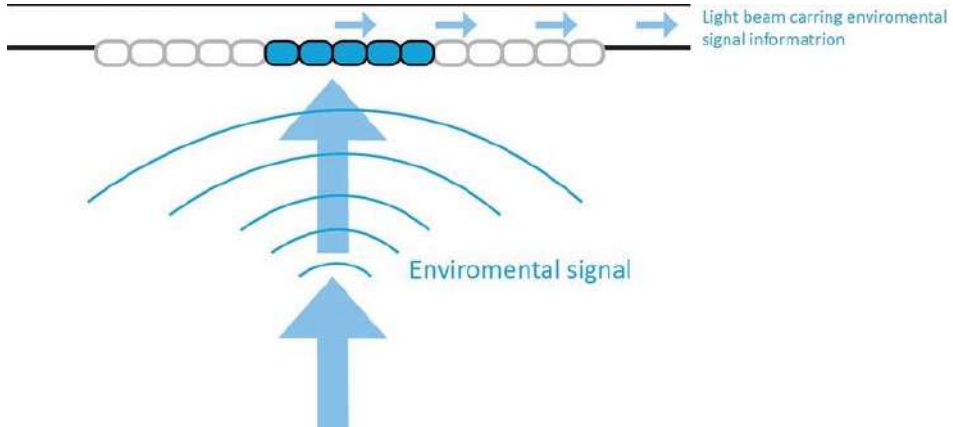
Fiberoptiska sensorer har använts med goda resultat vid många projekt och forskningsstudier för att identifiera och övervaka sprickor i betongkonstruktioner. Fiberoptiska sensorer kan förutom att identifiera och övervaka sprickor också mäta tryck, temperaturförändring, vibration, töjning, fukt, displacement mm (Enckell, 2011). En fiberoptisk sensor är antingen en intensimetrisk sensorer eller en extrinsisk sensorer. Det som skiljer de två olika typerna åt är sättet som sensorn känner av och registrerar den yttre påverkan, se Figur 9-3 för jämförelse mellan de två olika typerna.



Figur 9-3 Skillnad mellan intensimetrisk & extrinsisk fiberoptisk sensor (Awaring & Talk, 2011)

9.4.1 Intensimetrisk fiberoptisk sensor

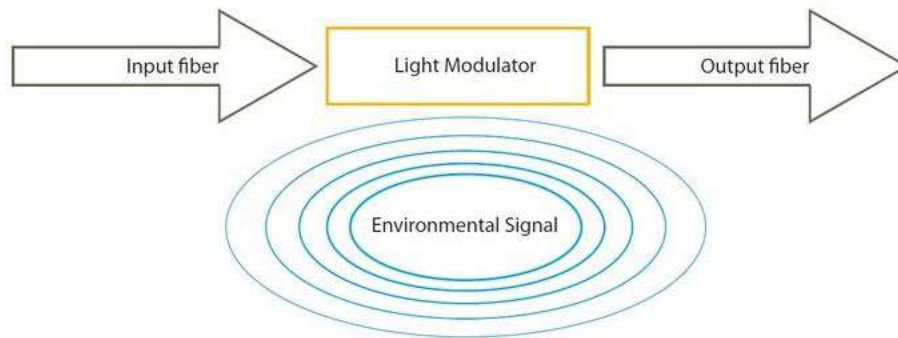
I en intensimetrisk sensor modifieras ljuset inuti fiberkabeln och kabeln fungerar som en transduktor se Figur 9-4. När fiberkabeln blir utsatt för yttre påverkande faktorer så utvidgas eller kontraheras kabeln varvid ljuset genomgår en fasändring. Det är ändringen i reflektionen som registreras och omvandlas till en elektrisk signal i en datainsamlingsenhet (Sharma & Wei, 2013).



Figur 9-4 Intensimetrisk fiberoptisk sensor (Awaring & Talk, 2011)

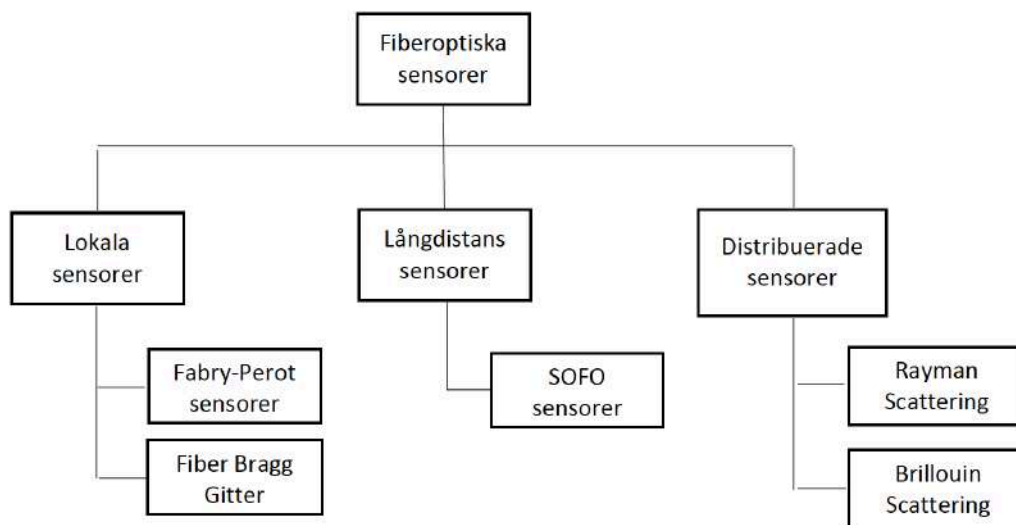
9.4.2 Extrinsisk fiberoptisk sensor

I en extrinsisk fiberoptisk sensor så transporteras ljuset till en transduktor i systemet som registrerar de yttre påverkande faktorer och förändrar ljusreflektionen se Figur 9-5. Därefter förs det modifierade ljuset tillbaka in i samma eller en ny kabel och förs till en datainsamlingsenhet där ljuset analyseras och omvandlas till en elektrisk signal. I en extrinsisk fiberoptisk sensor utförs alla mätningar i det externa instrumentet och fiberkabeln fungerar enbart som en bärare av ljuset (Sharma & Wei, 2013).



Figur 9-5 Extrinsisk fiberoptisk sensor (Awaring & Talk, 2011)

Fiberoptiska sensorer finns i många olika utförande och användningsområden. I Figur 9-6 sorteras sensortyperna, utifrån hur stort område som sensortyperna mäter. Lokala sensorer mäter över små väldefinierade områden oftast i storleksordning centimetrar. Långdistans sensorer mäter över områden i storleksordning meter. Distribuerade sensorer mäter över hela konstruktionens storlek och är i storleksordning kilometer.

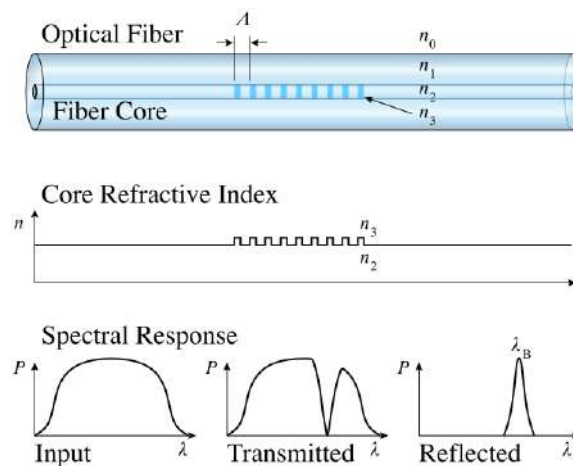


Figur 9-6 Uppdelning av fiberoptiska sensorer baserad på storlek på mätområde

9.4.3 Fiber Bragg Gitter

Den vanligaste, enklaste och kanske mest använda fiberoptiska sensorn inom SHM är Fiber Bragg Gitter (FBG). Den tillverkas som en singelmod kabel och med hjälp av UV-laser så bränns ett gitter in i kärnan med ett centrumavstånd på 500 till 550 nm (Laboratories, 2008). När ljuset färdas i fiberkabeln och stöter på gittret så reflekteras en specifik våglängd av ljuset tillbaka så kallad Fresnel reflektion medan resten av ljuset passerar obekymrat förbi se Figur 9-7. Olika centrumavstånd mellan risporna i gittret reflekterar olika våglängder. FBG används för att detektera temperaturförändringar och töjningar. När fiberkabeln utsätts för temperaturförändringar eller töjning så ökar eller minskar avståndet i gittret och det reflekterade ljuset ändras. Den relativa skiftningen i det reflekterade ljuset mäts och analyseras och ger indikationer till förändringens ursprung.

En av FBG största fördelar är möjligheten att koppla samman många sensorer-, (upp mot tusen stycken (Wild & Hinckley, 2011)) på en och samma kabel, detta kallas för multiplexering.



Figur 9-7 FBG sensor (Sakurambo, 2008).

9.4.4 Fabry-Perot sensorer

En Fabry-Perot sensor baseras på interferometri mätning av ljus i en luftspalt och är en töjningsgivare se Figur 9-8. I fiberkabeln placeras två reflektorer med en luftspalt mellan sig, sensorlängden är längden på luftspalten. Den första reflektorn reflekterar en del av ljuset och är placerad framför luftspalten medan den andra reflektorn är en totalreflektor och placeras efter luftspalten. När kabeln utsätts för töjning så ändras längden på luftspalten och det reflekterade ljuset genomgår en fasändring som temperatur och töjning kan beräknas från. I en Fabry-Perot sensor så kan enbart en sensor placeras på grund av den totalreflekterande reflektorn vilket gör att sensorn inte kan använda multiplexering.



Figur 9-8 Fabry-Perot töjningsgivare (López-Higuera, Cobo, Quintela, & Madruga, 2010)

9.4.5 Michelson and Mach Zehnder interferometrar

Michelson och Mach Zehnder interferometrar är fiberoptiska förskjutningssensorer som kan upptäcka millimeterstora förskjutningar. Utav dessa så är Michelson den mest använda. Sensorn består av två fibrer inkapslade i en behållare. En av fibrerna är förspänd och den andra placeras löst inne i metallbehållaren. Den lösa fibern används som referensfiber för temperaturkompensering medan den förspända fibern registrerar töjning. Behållaren och fiberns längdförändring är densamma och detekteras genom mätning av ljuset förändring.

9.4.6 Distributed Optical Fiber Sensor

Distributed Optical Fiber (DOF) kan mäta temperaturförändringar och töjning. DOF använder sig av en fiberoptisk kabel vars längd kan vara i storleksordningen km. Kabeln kan utföra mätningar utmed hela kabelns längd och den använder sig av Raman och Brillouin bakåtspridning som kallas backscattering på engelska. När en ljussignal färdas i en fiberoptisk kabel så kommer majoriteten av ljuset att färdas rakt igenom kabeln utan att interagera med atomerna i fibern. Men en liten del av våglängden, närmare bestämt två våglängder kommer att studsas mot atomerna och reflekteras tillbaka till ljuskällan. De två våglängderna kallas för Raman och Brillouin våglängder. Raman används för att mäta temperaturförändringar då våglängden är känslig för atomernas rörelser som beror på atomernas energiinnehåll. Atomernas energiinnehåll ger upphov till en fasändring av Raman våglängderna som registreras av datainsamlingsenheten.

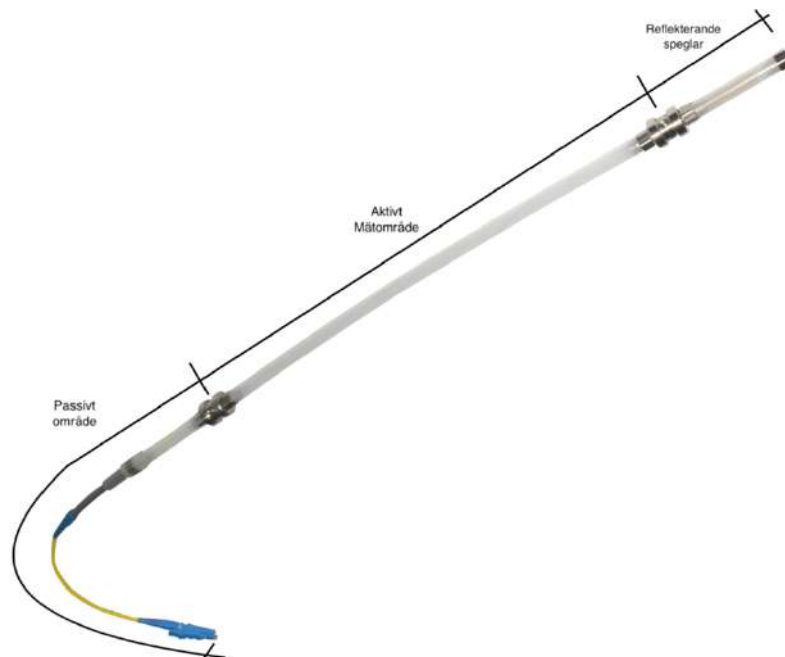
Brillouin våglängderna är känslig för atomernas inbördes avstånd. När kabeln utsätts för en töjning så ökar eller minskar avståndet mellan de enskilda atomerna. Detta ger upphov till en fasändring av Brillouin våglängderna som registreras av datainsamlingsenheten.

Genom att mäta tiden mellan insignal och registrerad bakåtspridning så kan avståndet till förändringen beräknas och därmed kan man lokalisera var förändringen har ägt rum. Det är på så sätt man kan lokalisera vart t.ex. en spricka har uppstått eller temperaturförändringar.

9.5 Fiberoptiska sensorsystem för sprickor

9.5.1 SOFO system

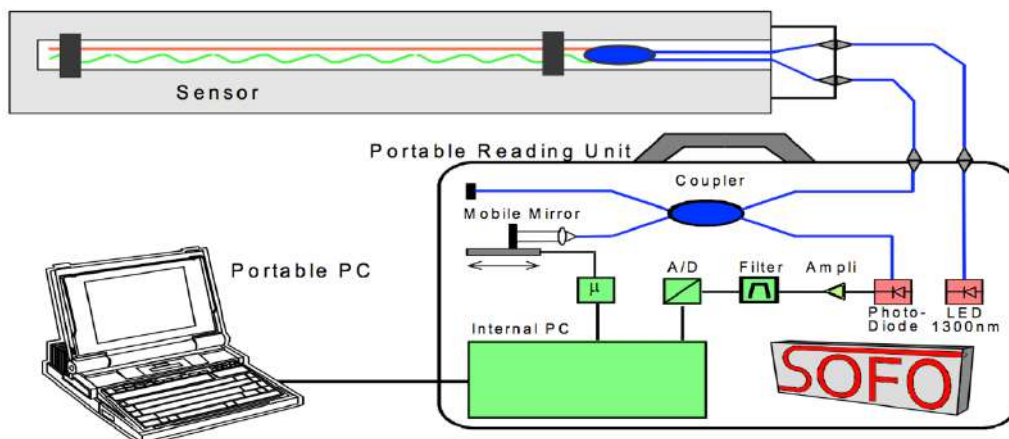
SOFO-systemet är ett deformationssystem som använder sig av Michelson sensorer som är beskrivna i stycke 9.4.5. Sensorn är uppdelad i tre olika regioner, de är det passiva området, aktiva mätområdet och ett utrymme för de reflekterande speglarna se Figur 9-9. Längden på det aktiva mätområdet på en sensor är mellan 0,2–20 m beroende på vad som behövs i projektet. Sensorn kan upptäcka μm stora deformationer.



Figur 9-9 Redovisning av passivt-, aktivt område och utrymme för reflekterande speglar

Sensorn har långsiktig stabilitet och är okänslig för temperaturförändringar. SOFO-systemet kan utföra statiska och dynamiska mätningar. De funktionella principerna för ett statiskt SOFO-system kan ses i Figur 9-10.

SOFO systemet utvecklades på IMAC laboratoriet av Swiss Federal Institute of Technology in Lausanne (EPFL) 1992 (López-Higuera, o.a., 2010). SOFO systemet industrialiserades av SMARTEC 1996. Systemet har använts på många olika konstruktioner runt om i världen se (Inaudi & Glisic, 2008) för en genomgång av olika projekt där SOFO har använts.



Figur 9-10 SOFO-system för statisk mätning (López-Higuera, Cobo, Quintela, & Madruga, 2010)

Sensorn består av ett par singelmodfiber inkapslade i en behållare som installeras på strukturen som ska övervakas. Sensorn kan antingen gjutas in i nya betongkonstruktioner, fästas med L-järn på utsidan av en existerande konstruktion eller limmas fast se Figur 9-11.



Figur 9-11 Exempel på infästning av SOFO-sensorn (SMARTEC, 2009)

Den ena av fibrerna som kallas mätfiber är monterad förspänd i behållaren medan den andra fiber som kallas referensfiber är löst monterad och används för temperaturkompensering. All deformation av strukturen kommer då skapa en skillnad i längd mellan de två fibrerna som resulterar i en fasändring av ljuset, fasändringen registreras och omtolkas till en deformation. Sensorn är i sin tur kopplad till en datainsamlingsenhet som på engelska kallas Reading Unit se Figur 9-12 för ett exempel. Det är i datainsamlingsenheten som fasförskjutningen mäts med hjälp av en fast monterad spegel och en rörlig spegel. Datainsamlingsenheten kan vara bärbar eller permanent installerad vid konstruktionen. Datainsamlingsenheten består av en ljusdiod som sänder infrarött ljus längs med sensorn via en koppling ("Coupler"). Det infraröda ljuset färdas sedan längst med sensorn innan det studsar mot monterade speglar i änden av varje fiber och returneras tillbaka för analys. I datainsamlingsenheten så förstärks signalen av en förstärkare ("Amplifier"), filtreras i ett filter (Filter) för att reducera brus innan den analoga signalen omvandlas till digitala signaler i en ADO ("A/D"). Den digitala signalen registreras av en dator inne i datainsamlingsenhet innan den överförs till en extern server eller extern dator.



Figur 9-12 SMARTEC SOFO datainsamlingsenhet (SMARTEC, u.å)

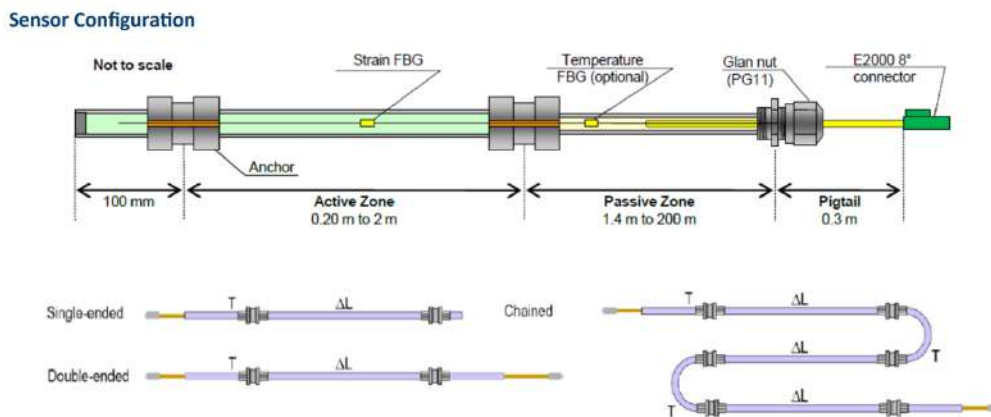
SOFO systemet används främst för att mäta deformationer men kan upptäcka nya sprickor och övervaka existerande sprickor i en konstruktion. För att identifiera nya sprickor och för att övervaka existerande sprickor i konstruktionen används statisk mätning. För övervakning av existerande spricka monteras det aktiva mätområdet på sensorn över sprickan.

9.5.2 MuST-system

MuST systemet använder sig av FBG sensorer och kan mäta deformation och temperatur genom statiska eller dynamiska mätningar. Sensorn består av ett aktivt område ("Active Zone") och ett passivt område ("Passive Zone"). Den aktiva delen innehåller mätfibrerna och mäter deformationerna mellan sina två ändor ("Anchor"), en viss våglängd av ljuset reflekteras i gittret och registreras av datainsamlingsenheten. Den passiva delen är okänslig för deformationer och används för att ansluta sensorn till datainsamlingsenheten. I den passiva delen av sensor, är det möjligt att installera ett löst FBG för temperaturkompensation. Sensorerna finns tillgängliga för anslutning i en ände ("Single-ended"), två ändor ("Double-ended") och används då för multiplexering eller kan köpas i färdig multiplexerade längder ("Chained") med anslutning i bägge ändor.

Det aktiva området har en längd som varierar mellan 0,2-2m, det passiva området har en längd som varierar mellan 1,4-200m. Se Figur 9-13 för en principiell skiss av en MuST sensor där de aktiva och passiva områdena visas.

MuST sensorn kan gjutas in i ny betong eller fästas på utsidan av en existerande konstruktion. Vid installation på utsidan så används samma metoder som SOFO-systemet och infästningen sker i ändarna av varje område se Figur 9-11 för exempel.



Figur 9-13 MuST sensorer (SMARTEC, u.å)

För att övervaka existerande sprickor så används statisk mätning och det aktiva området monteras över sprickan se Figur 9-14. Systemet kan då övervaka sprickans deformationer och varna ifall de definierade gränsvärdena för deformation överstigs.

För detektering av nya sprickor så krävs det tur att det aktiva området är placerat exakt där sprickan uppstår. Då det är en svårighet så används MuST sensor sällan för att upptäcka nya skador utan främst för att övervaka existerande.



Figur 9-14 Exempel på montering av MuST-system för sprickövervakning (Brown, u.å)

9.6 Presentation av en fallstudie på sprickövervakning med ett SOFO system

9.6.1 Inledning

Som fallstudie för övervakning av sprickor med SOFO systemet så presenteras en studie i Gandria kyrkan i Schweiz utförd av D. Inaudi., N. Casanova., B. Glisic och hela fallstudien går att läsa i (Inaudi, Casanova, & Glisic, 2001). Denna fallstudie används för att processen att övervaka en spricka är densamma då kupolen är utförd i betong.

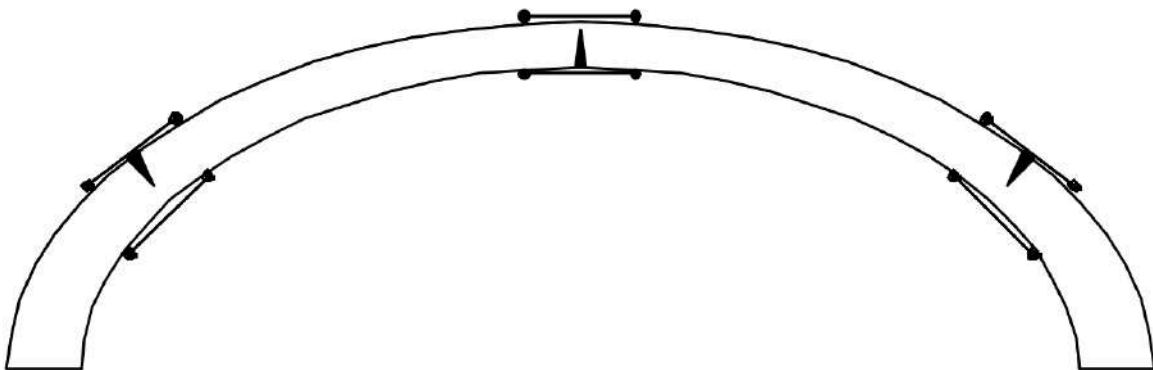
9.6.2 Bakgrund

I kyrkans kupol hade synliga sprickor upptäckts på kupolens konvexa sida till följd av ett tidigare renoveringsarbete. Vid vidare undersökning så upptäcktes även sprickor på kupolens konkava sida. Sprickorna skapade en oro om kupolens hållfasthet och ifall ett ras skulle uppstå. Det hade installerat nya glaspaneler över sprickorna som hade spruckit. SOFO sensorer installerades för att övervaka sprickornas dagliga- och säsongsberoende variationer samt för att få en bättre förståelse för kupolens verkningssätt.

9.6.3 Fallstudiens genomförande

10 st. SOFO sensorer vars aktiva mätområde varierade mellan 30–50 cm installerades över sprickorna både på den konkava och konvexa sidan se Figur 9-15. Sensorerna fästes på kupolen med L-järn se Figur 9-16. På grund av budgetbegränsningar och för att man antog att sprickorna skulle utvecklas långsamt så beslutades det emot att installera en permanent datainsamlingsenhet i kyrkan. Projektet använde sig av en bärbar datainsamlingsenhet och utförde periodiska mätningar under 1 års tid. De periodiska mätningarna varade under en veckas tid följt av en tre månaders period där inga mätningar utfördes.

SOFO sensorerna registrerade sprickornas töjningar och temperaturen inne i kyrkan för att kunna korrelera temperaturskiftningar med sprickornas töjningar. Alla sensorer installerades på en dag och stor vikt lades på att sensorerna skulle synas så lite som möjligt.



Figur 9-15 Placering av SOFO sensorer på kyrkkupolen



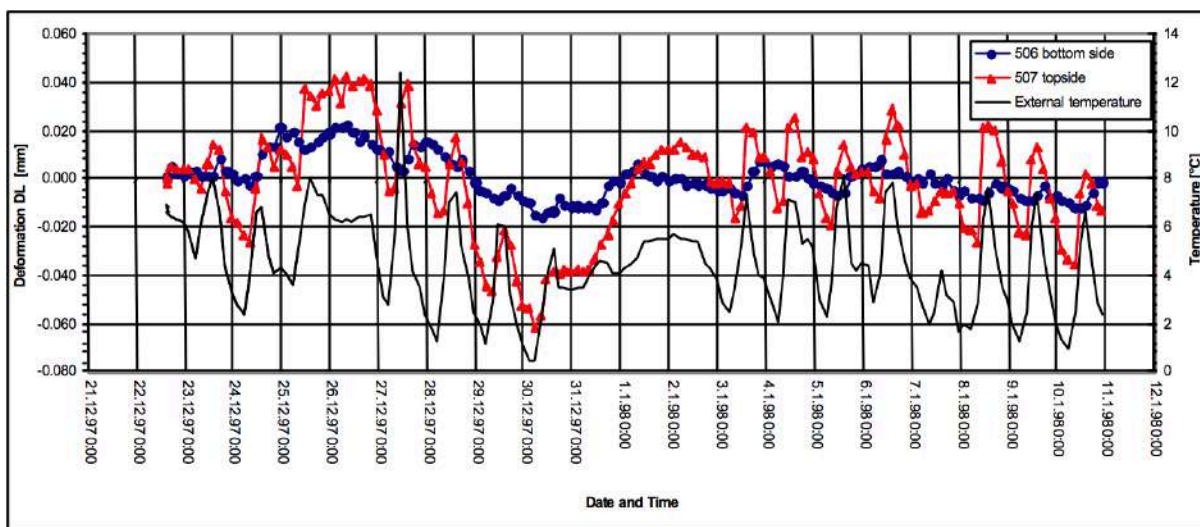
Figur 9-16 Montering av SOFO sensorer med L-järn

9.6.4 Fallstudiens resultat

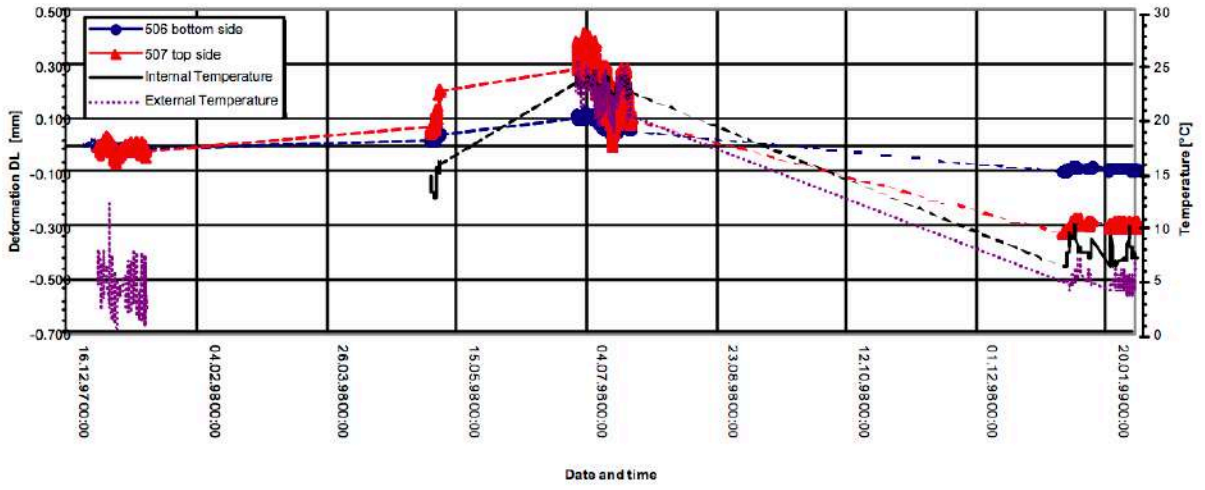
De dagliga deformationerna kan tydligt identifieras i Figur 9-17 och man kan speciellt observera stora variationer i sprickornas deformationer den 24–25 december, då kyrkan värmdes upp för julfirandet som skulle äga rum i kyrkan. Den totala amplituden för deformationen under ett år se Figur 9-18 var ganska stor (upp till 0,6 mm). Det förklarar orsaken till den snabba sprickningen av glasplattorna som installerades på sprickan. Trots att spricköppningen varierade betydligt från dag till dag fann man en stark korrelation till temperaturändringarna. Då kunde slutsatsen dras att kupolen hade funnit en ny statisk jämvikt, även om lastfördelningen hade förändrats i valvet och sprickvariationerna endast var temperaturberoende.

Det gick att observera att de ytterligare deformationerna som uppstod under året inte var helt reversibla. SOFO sensorerna uppmätte en liten kompression av 0,1 och 0,3 mm i 2 olika sprickor. De värdena ansågs inte vara betydande eller utgöra ett hot mot kupolen hållfasthet.

Långtidsövervakningen bidrog till att öka kunskapen om kupolens verkliga beteende, vilket ledde till att man kunde revidera underhållsplanen för kupolen och skjuta på planerade renoveringar in i framtiden.



Figur 9-17 Dagliga variationer av en sprickas deformationer under perioden 21/12-97 - 12/1-97



Figur 9-18 Årlig variation av sprickans storlek

9.7 Presentation av en fallstudie på sprickdetektering med ett SOFO system

9.7.1 Inledning

I det här kapitlet presenteras kortfattat hur ett SOFO system kan användas för att detektera sprickor i en ny konstruktion. Kapitlet presenterar en fallstudie som gjordes på den nya Årstabron i Stockholm se Figur 9-19. Fallstudien hade ett flertal syften, alla syften finns beskrivna i bakgrunden men denna presentation syftar främst till att beskriva sprickdetekteringen som utfördes med ett SOFO system. Hela fallstudien går att läsa i (Enckell, 2006).



Figur 9-19 Nya Årstabron (Larsson, 2011)

9.7.2 Bakgrund

Nya Årsta järnvägsbro är belägen i Stockholm, konstruktionen är mycket slank och en liknande struktur hade inte tidigare provats och därför rådde en osäkerhet i brons dynamiska och statiska beteende. Trafikverket inledde en mätkampanj år 2003 på bron för att studera och skaffa sig en djupare förståelse för det dynamiska och statiska beteendet.

Syftet med den statiska studien var:

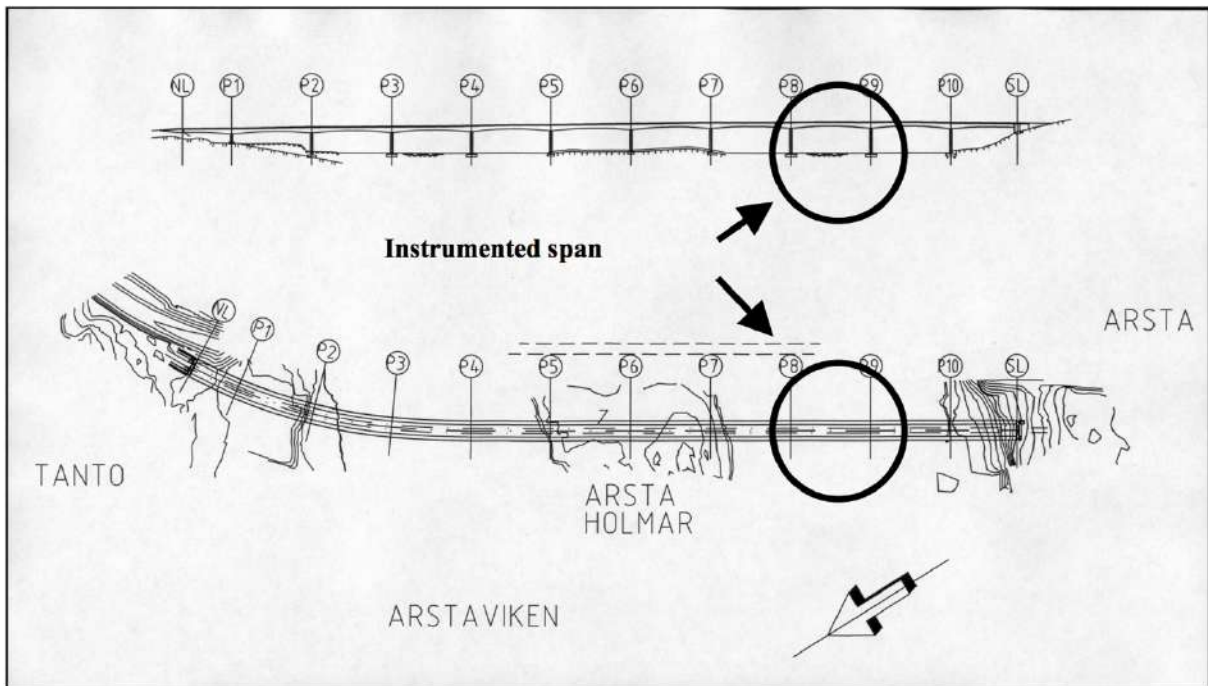
- Kontrollera de maximala belastningarna
- Upptäcka sprickbildning i strukturen
- Rapportera belastningsändringar under uppförande, testperioden och under de kommande 10 åren
- Beräkna kurvaturen hos den instrumenterade spänningen.

Syftet med den dynamiska studien var:

- Bestämma egenfrekvenserna och dämpningsfaktorer
- Studera de dynamiska effekterna av de rörliga tågen på bron
- Studera de långsiktiga förändringarna i de dynamiska egenskaperna hos bron.

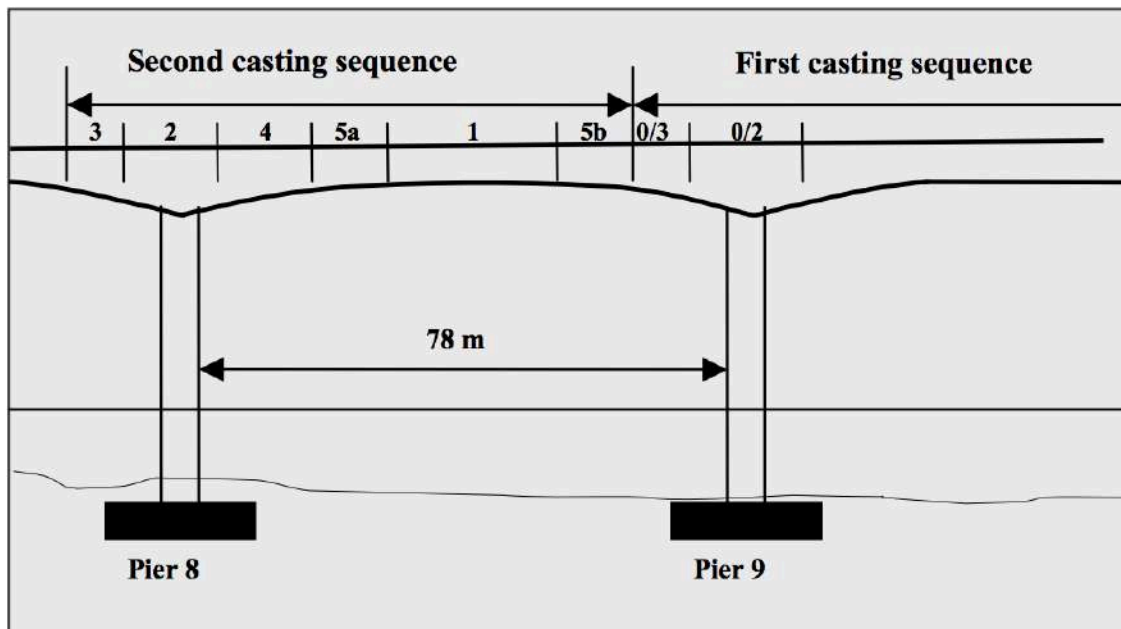
BEMEK AB, representant för SMARTEC i Sverige, ansvarade för leverans av hårdvara och mjukvara och för installationen av fiberoptiska sensorer och termoelement. BBK AB, tekniskt stöd till BEMEK AB ansvarade för installationen av programvaran, datakommunikation, systemservice och felsökning av det fiberoptiska systemet. KTH ansvarade för produktion och installation av spänningsomvandlare, och för leverans och installation av accelerometrarna. KTH ansvarade för den statiska och dynamiska analysen av data.

Årsta bron består av tio förspända betongspänn där längden på varje spann är 78 m. Spannerna är numrerade från 1–10 och instrumentationen utfördes i spann P8-P9. se Figur 9-20.

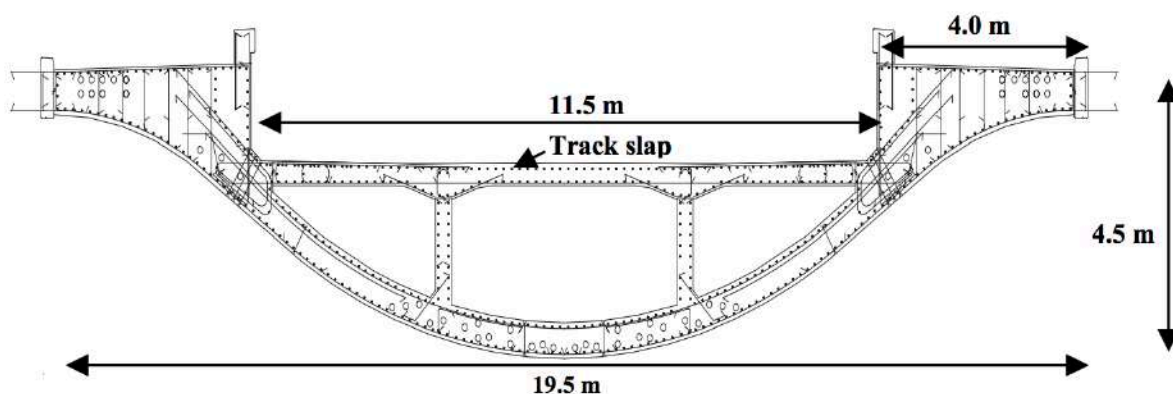


Figur 9-20 Indelning av de 10 olika spannen som uppgör Årstabron

Varje spann i Figur 9-20 är i sin tur indelat i flera delsektioner och dessa visas i Figur 9-21. En sektionsvy visas i Figur 9-22



Figur 9-21 Indelningen i delsektioner



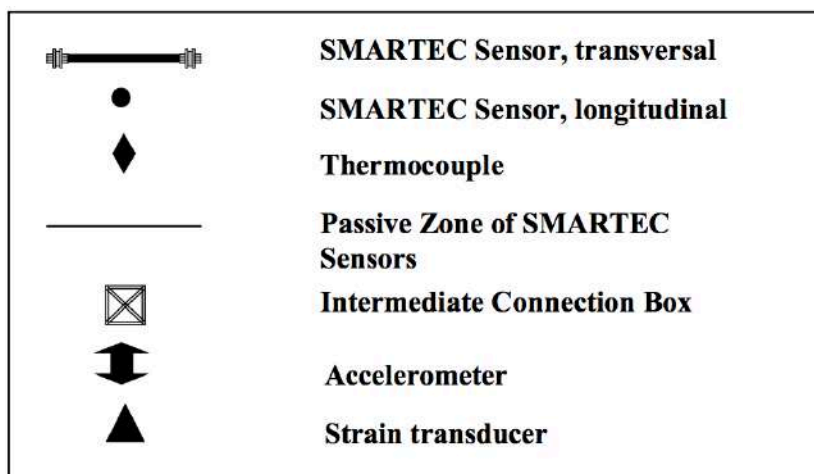
Figur 9-22 Typiskt snitt av Årsta järnvägsbro

9.7.3 Fallstudiens genomförande

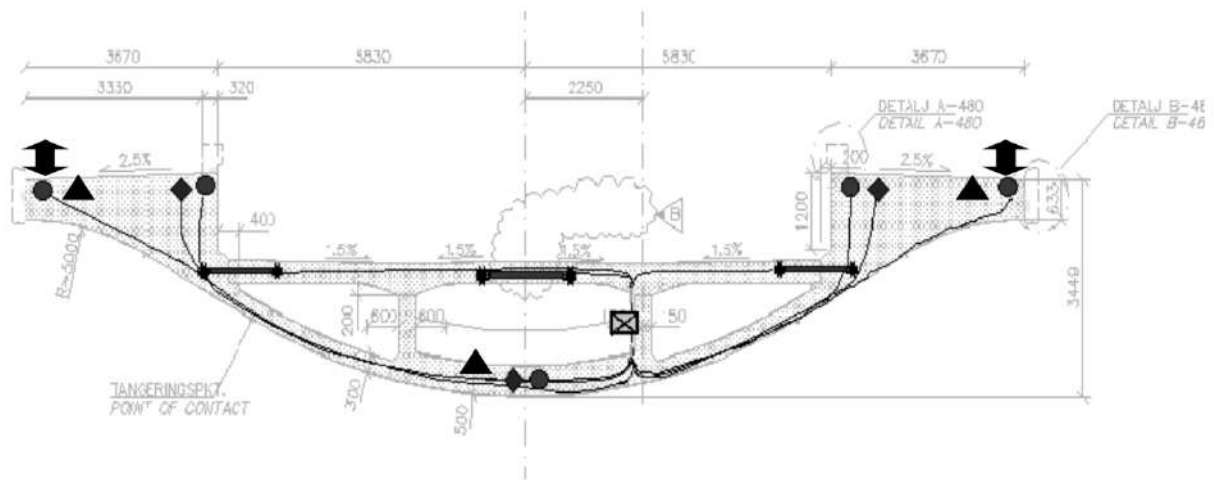
Årstabron övervakas permanent med 40 SOFO sensorer, 9 termoelement, 20 folietöjningsgivare och 6 accelerometrar. SOFO sensorerna är både ingjutna i konstruktionen och monterade på ytan med L-järn. En principiell skiss över placeringen av sensorerna kan ses i Figur 9-24 och förklaringen till de olika symbolernas betydelse finns i Figur 9-23. SOFO sensorerna installerades i fem sektioner av spannet P8 till P9 på bron. Varje sektion består av fem longitudinella sensorer och tre eller två transversala sensorer som är inbäddad i betongen. Fyra längsgående sensorer placerades i konsolen, två på varje sida och en sensor i mitten på botten av tvärsnittet.

Längden på de längsgående fiberoptiska sensorerna är 6 m i sektionerna 1 och 4. De längsgående SOFO sensorerna i sektionerna närmast stöden P8 och P9 har en längd på fyra meter. Sektionen 1 och båda sektionerna vid stöden P8 och P9 installerades med tre transversala fiberoptiska sensorer som placeras i plattan. Nio termoelement installerades i tre av sektionerna i bron, de installerades i sektion 1 och i sektionerna vid stöden P8 och P9.

Alla SOFO sensorer kopplades samman med datainsamlingsenheten som var belägen på stöd P9. KTH:s folietöjningsgivare och accelerometrar installeras i tre sektioner på bron.



Figur 9-23 Symbolförklaring för sensorernas placering



Figur 9-24 Principiell skiss över placeringen av sensorerna

Ett lasttest utfördes innan bron öppnades för trafik för att kontrollera töjningarna i bron samt lasteffekten av ett fullastat tåg. Ett tåg med ett lokomotiv och 10 vagnar fyllda med ballast placerades på bron och mätningarna utfördes när tåget belastade bron. Lokomotivets vikt var 88 ton och längden 15,42 m. Varje vagn lastades med ballastvikter på 80 ton. Tåget stannade på bron så att ballastvagnar fyllde två spann, från stöd 8 till stöd 10. Tåget stod still på denna position mellan 09.55 och 10.24. Sedan började tåget långsamt att köra över till andra ändan av bron tills hela tåget hade kört av bron. Tåget backades då tillbaka så att fyra och en halv vagnar stod placerad i det sista spannet. Här stod tåget still mellan 10:42 till 10:46 innan tåget kördes av bron kl. 10:47.

Lasttestet övervakades med SOFO-systemet såväl som KTH:s folietöjningsgivare. SOFO-systemet mätte förskjutningen som dividerades med sensorns längd för att få den genomsnittliga töjningen. KTH:s folietöjningsgivare mätte spänning som omvandlades till töjning. Mätningar med SOFO systemet togs ungefär var sjätte minut eftersom det var tiden det tog för att utföra mätningar med de 40 sensorerna och termoelement.

KTH systemet mätte 10 gånger per sekund. Alla KTH:s folietöjningsgivare var 0,3 meter långa och de longitudinella SOFO sensorernas aktiva område var 4 till 6 meter och de transversala SOFO sensorernas aktiva område var 0,4 till 6 meter. Temperatureffekterna bedömdes vara försumbara jämfört med lasteffekten under den korta tidsperioden som testet ägde rum.

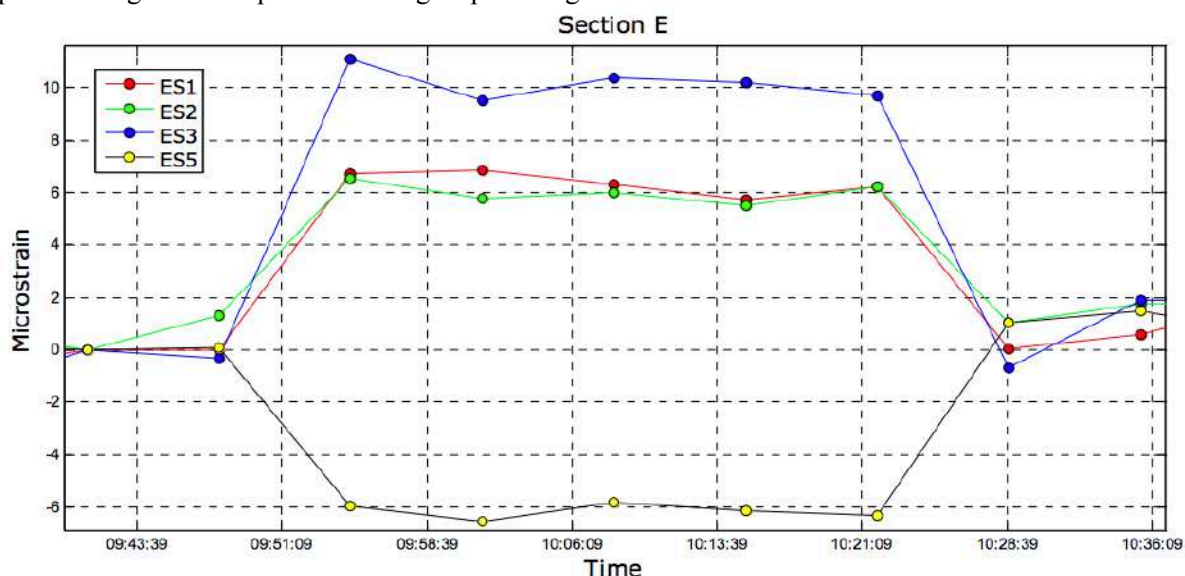
För att detektera sprickor i konstruktionen så utfördes långtidsmätningar på bron.

9.7.4 Fallstudiens resultat

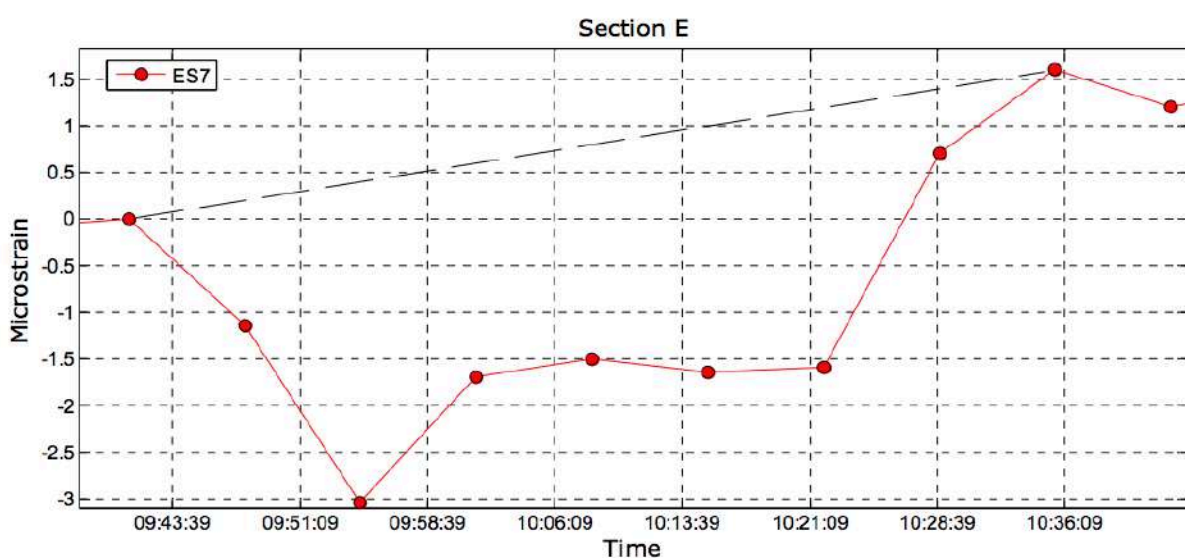
I det här kapitlet presenteras kortfattat resultaten ifrån mätningarna som utfördes i sektionen närmast stöd P8, sektionens placering kan ses i Figur 9-21 och ingår i andra gjutningen ("second casting sequence") och har identifikationsnumret 2, i original rapporten kallas denna sektion för sektion E. Denna sektion valdes för att fallstudien redovisar resultat över sprickdetektering i den sektionen. Sektionen är utrustad med följande sensorer: SOFO sensorer, ES1, ES2, ES3 och ES5 orienterat longitudinellt och SOFO sensorer ES7 orienterat i transversal riktning.

Resultat töjningar och maximala lasteffekter

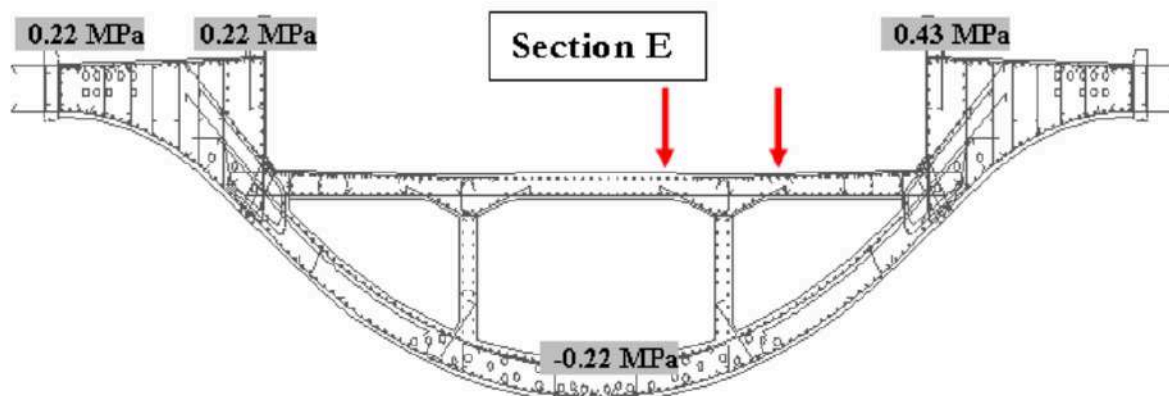
I figurerna Figur 9-25, Figur 9-26 och Figur 9-27 redovisas de uppmätta töjningarna i sektionen samt de beräknade maximala drag och tryckpåkänningarna som bron utsattes för under lasttestet. De röda pilarna i Figur 9-27 representerar tågets placering.



Figur 9-25 Uppmätta töjningar i longitudinell riktning med SOFO sensorer



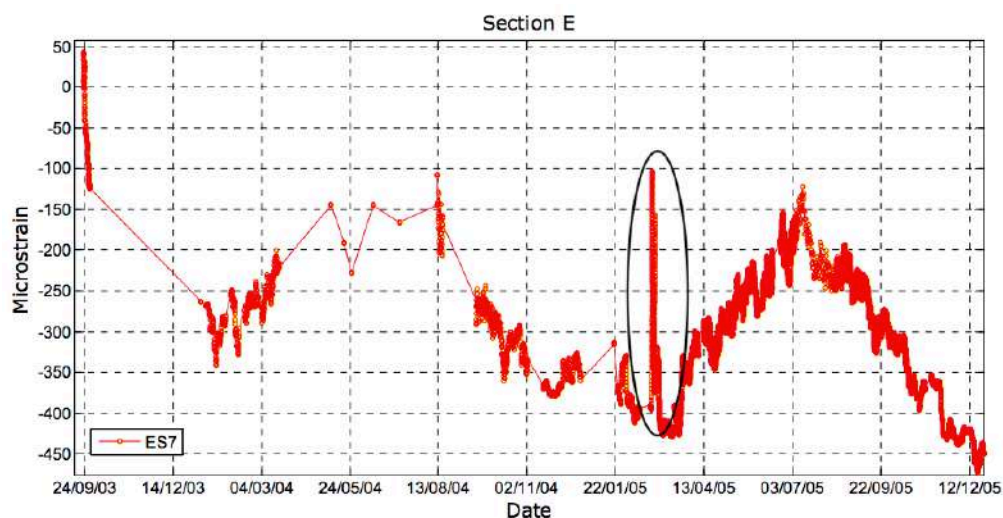
Figur 9-26 Uppmätta töjningar i transversal riktning med SOFO sensorer



Figur 9-27 Beräknade maximala spänningar som uppstod under lasttestet ((+ maximalt drag), (- maximalt tryck))

Sprickdetektering

Då sprickbildning är ett normalt fenomen som uppstår när man arbetar med betong, så beslutades det att en undersökning skulle utföras om det är möjligt att detektera sprickor med SOFO systemet. Plötsliga töjningsförändringar och dagliga variationer noterades för att upptäcka sprickbildning i konstruktionen. När hela bron var klar uppträdde några mycket höga positiva belastningstoppar i flera sensorer se Figur 9-28 där ett exempel ifrån sensor ES7 i sektion E visas. En okulär inspektion utfördes där töjningstopparna hade registrerats och flera sprickor hittades på brodäcket.



Figur 9-28 Sensor ES7 töjningsdiagram under perioden 24/9-03 – 12/12-05. Med den höga töjningstoppen markerad

Några slutsatser som kunde dras ifrån fallstudien är att fiberoptiska sensorer visar goda resultat och mycket information om konstruktionen och dess beteende kunde fångas genom övervakning. Resultaten tillhandahåller sekventiellt användbar information om betongens och strukturs beteende i flera steg; under betongens tidiga ålder, under konstruktion, på lång sikt, under termisk belastning och under det statiska testet.

Övervakning visade att det gick att identifiera sprickbildning i strukturen. De första sprickorna upptäcktes i snitt 5b genom att identifiera höga värden av dagliga variationer. För det andra noterades mycket höga belastningstoppar i vissa mätningar som studerades i detalj. Det upptäcktes att någon form av överbelastning, eller olycka hade ägt rum och brodäcken utsattes för dragspänningar som översteg betongens sträckgräns vilket ledde till sprickbildning. En visuell inspektion bekräftade övervakningsresultaten och flera längsgående sprick observerades i de övervakade sektionerna. Brodäcken var inte utrustade med termoelement så temperaturutvärdering kunde inte utföras.

10 Akustisk emission SHM-system

10.1 Inledning

I en konstruktion som utsätts för inre spänning och yttre mekaniska krafter kan deformationer uppstå. När en deformation uppstår, omfördelas spänningarna i materialet och ett kort snabbt utsläpp av energi i form av elastiska vågor genereras, så kallade akustisk emission (AE).

AE kan normalt inte uppfattas av människan utan hjälp av alyssningsinstrument. Knarrande från en träkonstruktion när den närmar sig deformation är dock ett exempel på AE som faktiskt är hörbar för det mänskliga örat. Ett annat bra exempel är ljudet från sten när det går mot deformation, ett fenomen som har använts under lång tid i gruvor för att upptäcka nära förestående kollaps (Liptai, Harris, & Tatro, 1972).

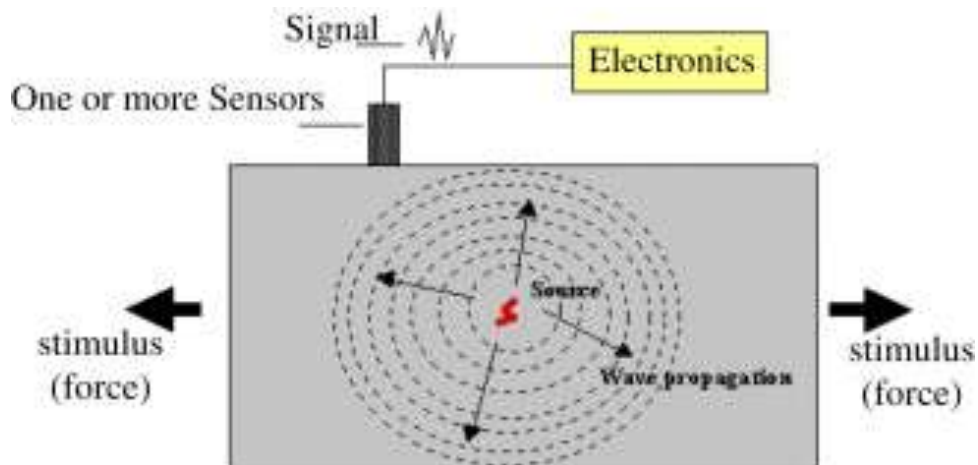
Analys av emissioner har använts under lång tid inom olika fält. Ett av det troligt äldsta användningsområdet tillsammans med gruvor är jordbävningar. När jorden vibrerar används en seismograf för att känna av vibrationsvågorna och bestämmer läge och styrka på skalvet (Liptai, Harris, & Tatro, 1972).

Den person som är krediterad med att ha startat den moderna forskningen i AE är Joseph Kaiser. Joseph Kaiser har fått det materialvetenskapliga fenomenet kaisereffekten döpt efter sig. Vilket är ett mycket användningsbart verktyg inom forskning om AE (Liptai, Harris, & Tatro, 1972).

10.2 AE-system

Mätning av AE i en konstruktion innefattar tre steg se Figur 10-1.

1. Materialet deformeras och elastiska vågor uppstår
2. Vågorna uppfattas med hjälp av sensorer som är placerade på kritiska positioner. Sensorerna omvandlar vågorna till elektrisk spänning med hjälp av piezoelectricitet och skickar signalerna vidare
3. En datainsamlingsenhet som tar emot och behandlar informationen och sedan skickar den till en server, redo för att avläsas



Figur 10-1 Princip för Akustisk Emission (Cai & Nair, 2010)

10.3 AE-Sensorer

AE-system använder sig av piezoelektriska sensorer se stycke 8.2 för att detektera deformationer i materialet. Sensorerna uppfattar de elastiska AE vågorna som är av mekanisk form och omvandlar dem till elektrisk ström. Idag finns det ett stort utbud av AE sensorer se Figur 10-2. Vilken sensor som behövs beror på vilka typen typ av mätningar som ska genomföras. T.ex. betongsprickor och kabelbrott har två helt olika frekvenser och kräver två olika sensortyper. När broar utrustas med AE-system rekommenderas användning av multiriktningssensorer. Multiriktningssensorer är en sensortyp som kan känna av vågor i alla riktningar, något som är viktigt inom SHM för att lokaliseringen av skadan ska vara så exakt som möjligt. Det är möjligt att kombinera en tvärriktningssensor som mäter i x och y-led med en enriktningssensor som mäter i z-led. På så sätt gör de två sensorerna samma mätning som en multisensor (Cai & Nair, 2010).

AE sensorerna monteras direkt på konstruktionen som den ska övervaka. Antingen används smältlim eller tvåkomponentslim t.ex. epoxi. Det är möjligt att fästa sensorerna i sensorhållare som i sin tur fästs på konstruktionen. Något som förenklar underhåll och utbyte av sensorerna.



Figur 10-2 AE Sensorer med olika frekvens känslighet (Cai & Nair, 2010)

10.4 Parametrisk indata

Extern påverkan på en konstruktion kan förändra karaktären på de akustiska emissionerna. Data från AE sensorerna justeras därför med hjälp av data från extra sensorer, så kallad parametrisk indata. Den parametriska indata som är mest intresserat är väderförhållanden. Framför allt vindhastighet, vindriktning, nederbörd, barometertryck, relativ fuktighet och temperatur (Gostautas & Watson, 2018). Informationen från AE-sensorer balanseras mot värdena från de parametriska sensorerna, så att resultatet blir mer balanserat och närmare verkligheten.

10.5 Förförstärkare

I anslutning till sensorn används en förförstärkare se Figur 10-3. Förförstärkaren uppfattar lågfrekventa signaler som genereras av sensorn och har i uppgift att förstärka signalerna till en användbar nivå. På så sätt förbättras signal-brusförhållandet och svaga signaler går att urskilja från bakgrundsljudet. Datainsamlingsenheter är fabriksinställda på lågimpedans. Därför omvandlar förförstärkaren högimpedans-signalerna från sensorn till lågimpedans-signaler (Vallen systeme, 2015).

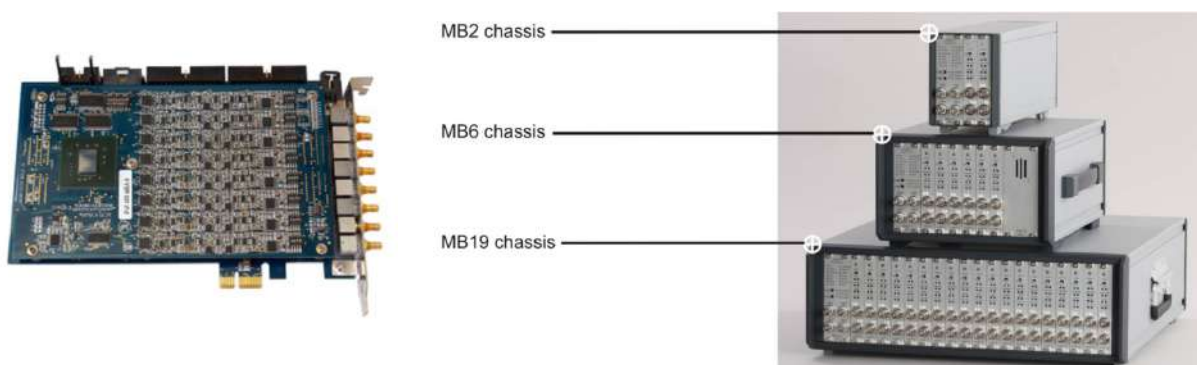


Figur 10-3 Förförstärkare från Mistras Groups (MISTRAS Group, 2019)

10.6 AE Datainsamlingsenhet

En AE datainsamlingsenhet innehåller två huvudkomponenter med tillhörande mjukvara. De två huvudkomponenterna är chassi och moderkort. Moderkortet se Figur 10-5 finns placerat inne i chassit. Chassit se Figur 10-4 består av kontroll- och bakpanel. Kontrollpanelen är placerad på framsidan av chassit, och har uttag för sensorer. Bakpanelen är placerad på baksidan av chassit och innehåller strömbrytare, säkringar, USB-uttag med mera. Information från sensorerna förs till moderkortet via kontrollpanelen.

Utöver moderkortet placeras signalöverbryggningskomponenterna: filter, förstärkare och ADO se stycke 7.1.3 i chassit. På så sätt effektiviseras systemet genom att många sensorer är kopplade till samma datainsamlingsenhet. De flesta AE-systemen använder sig av parametrisk indata se stycke 10.4 som hämtas från sensorer kopplade till datainsamlingsenheten. I dessa uttag kan traditionella sensorer kopplas in t.ex. trådtöjningsgivare se stycke 8.4. Signalerna skickas vidare via kabel eller trådlöst till en dator eller server för analys (Vallen systeme, 2015).



Figur 10-5 Moderkort för 8 sensorer från Mistras Group (MISTRAS Group, 2019)

Figur 10-4 Tre olika chassistorlekar från Vallen Systeme (Vallen systeme, 2015)

10.7 AE signaler

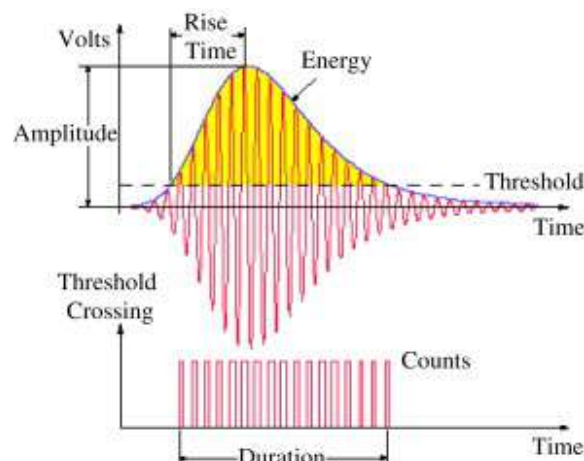
AE signaler kategoriseras i två grupper, primära och sekundära emissioner. De primära emissionerna kommer från själva konstruktionen medan de sekundära är alla emissioner som kommer ifrån yttre källor och som inte är av intresse, t.ex. från trafik (Cai & Nair, 2010).

AE bevakning av broar kan utföras lokalt eller globalt.

Dagens AE-system kan inte bara lokalisera var deformationen har inträffat, utan också känna av vilken typ av förändring som inträffat, enligt (Gostautas & Watson, 2018):

- Kabelbrott
- Sprickor i betong
- Utmattning av metall
- Kompositsskador
- Korrosion

Vilken skada som inträffat bestäms genom analys av emissionerna, då olika skador har olika karaktär. Dagens system kan mäta femton av dessa karaktärer för att avgöra skadetyper se Figur 10.6. Bland annat amplituder, absolut energi, stigtid, och frekvens (Gostautas & Watson, 2018).



Figur 10-6 Exempel på AE våg (Huang, o.a., 1998)

10.8 Kalibratorer

Vid användning av ett AE-system är det viktigt att det är ihopsatt och inställt på rätt sätt eftersom systemen är väldigt finkänsliga. Kalibratorer kan generera AE vågor med varierande amplitud, frekvens, långvarighet m.m. för att imitera vågor från materialdeformationer. Systemen kalibreras utifrån dessa signaler och på så sätt säkerställs riktigheten i mätresultaten.

10.9 Presentation av fallstudie över sprickövervakning med ett AE-system

10.9.1 Inledning

I det här kapitlet presenteras kortfattat hur ett AE-system användes för att bevaka Varina-Enon bron i Richmond, Virginia. Hela fallstudien går att läsa i (Parmar & Sharp, 2010).

10.9.2 Bakgrund

Varina-Enon bron öppnades för trafik i juli 1990. Varina-Enon är en 2000 meter lång snedkabelbro som har tre filer i vardera köriktningen.

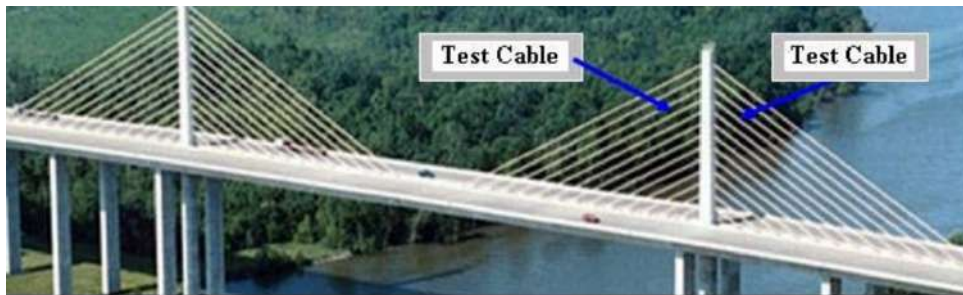
Mistras Group fick tillsammans med Hamptons University i uppgift att genomföra korttidsmätningar av bron med ett AE-system. För att bedöma tillståndet på en kabel som befarades ha brustna kabelsträngar.

10.9.3 Fallstudiens genomförande

Under mätningarna sökte sensorerna brott av kabelsträngar. Mätningarna genomfördes i två och en halv månader under både sommar och vinterhalvåret, 2008/2009. Detta för att samla data från så extrema väderförhållanden som möjligt. Kabeln av intresse var huvudkabel nr 10 se Figur 10-7. Mätningarna utfördes från förankringsplatsen i brobaneplattan genom pylonen och hela vägen ner i förankringsplatsen på andra sidan.

Under installationen av sensorerna upptäckte installatörerna från Mistras Group sprickbildning på kabelns sadel och sadelutrymme. Sadel och sadelutrymme var tillverkade av betong.

För att försäkra sig om att mikrosprickbildningen i sadeln och sadelutrymme inte skulle förvärras till den grad att den kan påverka konstruktionens funktion, så beslutades det att utrusta de med sensorer (Gostautas & Watson, 2018).



Figur 10-7 Varina-Enon bron med kabel nr 10 markerad (Parmar & Sharp, 2010)

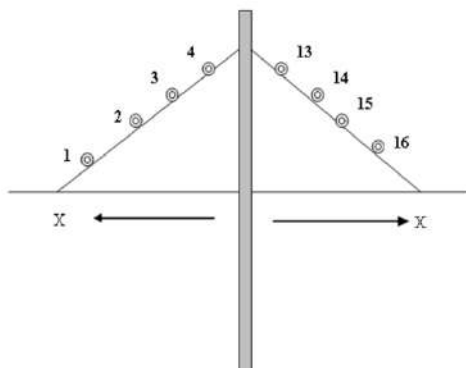
AE-systemet som användes var, Sensor Highway II från Mistras Group. Sensor Highway II är ett medelstort system med uttag för 16 AE sensorer. Sensorerna kopplades till en datainsamlingsenhet med hjälp av kablar. Informationen från datainsamlingsenheten skickades vidare till för analys till Hamptons University via ett trådlöst bredbandssystem.

Sensorerna limmades på plats med epoxi och säkrades med ett spännband. Installationen av systemet skedde med hjälp av en skylift se Figur 10-8.

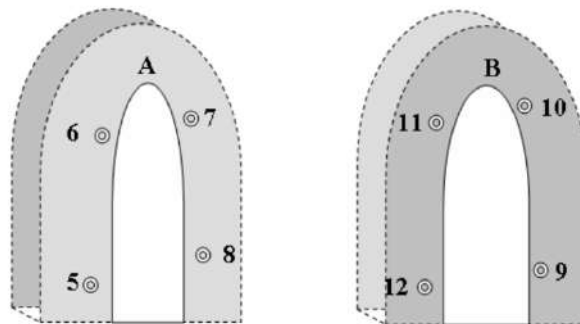


Figur 10-8 Installation av sensorerna (Parmar & Sharp, 2010)

På huvudkabeln nr 10 placerades åtta sensorer med jämna mellanrum, fyra på varje sida om pylonen se Figur 10-10. På sadeln placerades fyra sensorer på den östra sidan (A) och fyra på den västra sidan (B) se Figur 10-9.



Figur 10-10 Placering av sensorer på kabeln

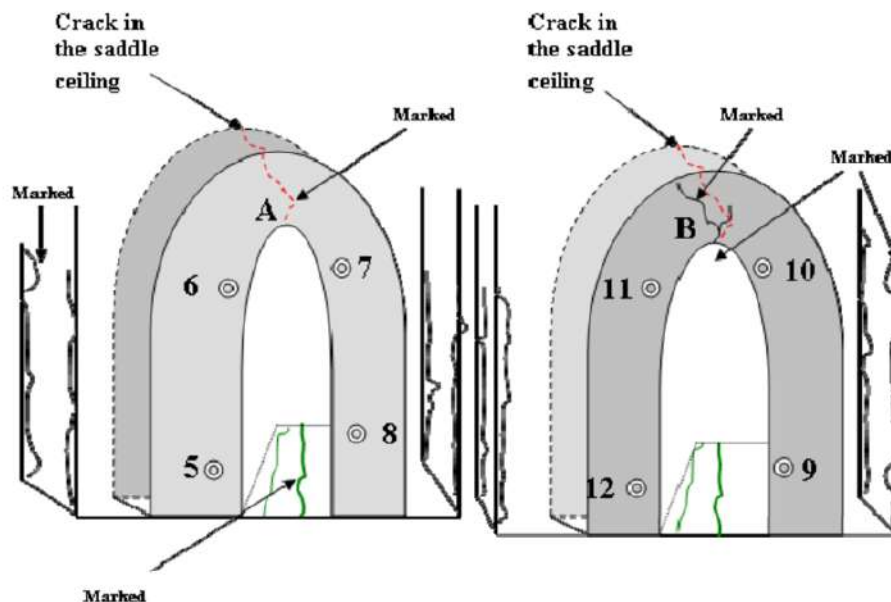


Figur 10-9 Placering av sensorer på sadeln

10.9.4 Fallstudiens Resultat

Huvudkabel: För sensorerna 2 till 4 och 13 till 15 uppfattades inga AE vågor från kabelbrott eller frakturer på kabeln. Sensor 1 och 16 uppfattades endast svaga signaler från snöflingor och fallande regndroppar på kabelns yta.

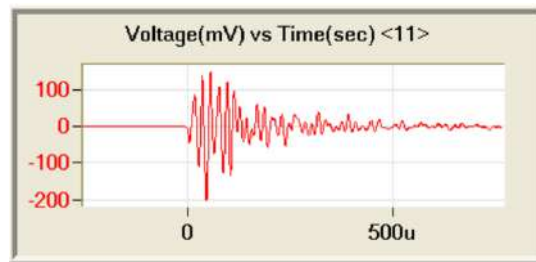
Sadel och pylon: Sensorerna som var placerade på de olika sadlarna uppfattade flera AE-vågor som härstammade från ny sprickbildning och friktion i de existerande sprickorna. 2D- och 3D-analyser av AE-data visade vilka områden på sadlarna som drabbades av de nya sprickorna och friktionen. Analysen visade att 98% av AE aktiviteten berodde på friktion och utvidgning i de existerande sprickorna. Resterande 2% av aktiviteten härstammade från ny sprickbildning. Det var inte själva sadeln som drabbades av ny sprickbildning, utan det var utrymmet som huserar sadeln. Figur 10-11 visar de existerande sprickorna ("Marked") och de nya sprickorna som uppkom.



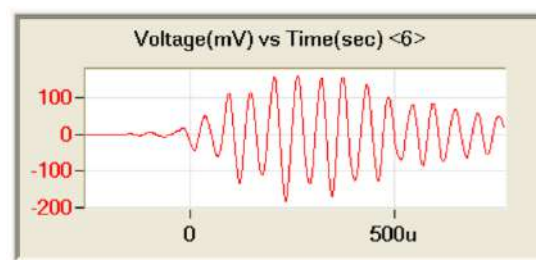
Figur 10-11 Sprickor på sadel och sadelhus

AE-Signaler

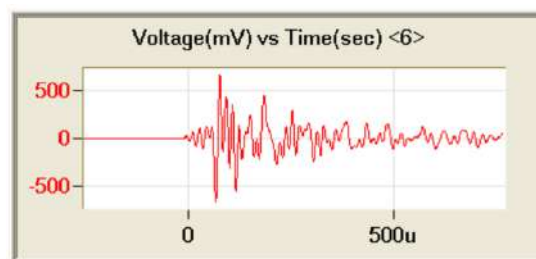
Nedan i Figur 10-12, Figur 10-13 och Figur 10-14 presenteras tre olika AE aktiviteter som inträffade under mätningen och identifierades av AE-systemet.



Figur 10-12 AE aktivitet som visar ny sprickbildning följt av friktion i sprickan. Vågorna med de höga amplituderna visar spricka., Den lägra amplituden visar friktionen. AE aktivitet identifierad av sensor 11



Figur 10-13 AE aktivitet som visar friktion i existerande spricka. AE aktivitet identifierad av sensor 6



Figur 10-14 AE aktivitet friktion i existerande spricka följt av ytterligare sprickbildning och sedan friktion igen. Identifierad av sensor 6

Mätningarna av Varina-Enon bron visade att kabeln var i bra skick och ingen akut åtgärd är nödvändig. Det uppdagades dock ny sprickbildning i sadelhuset något som på sikt kan leda till funktionsproblem för bron. Eftersom endast en sadel och ett sadelhus instrumenterades finns det risk för samma skador förekommer på liknade platser på bron.

10.10 Presentation av fallstudie på övervakning av korrosion i spännarmering med ett AE-system

10.10.1 Inledning

I det här kapitlet presenteras hur ett AE-system kan användas för att detektera brott på spännarmering i en konstruktion av förspändbetong. Kapitlet presenterar en fallstudie som gjordes på Hammersmith Flyover bron som är belägen på väg A4 i västra London se Figur 10-15 och hela fallstudien finns redovisad i (Mistras Group, 2018).



Figur 10-15 Hammersmith Flyover bron (Jones, 2018)

10.10.2 Bakgrund

Hammersmith Flyover öppnades för trafik 1961, och trafikeras dagligen av över 85 000 fordon. Bron är 622 meter lång med 16 spann och har två körfält i vardera riktningen.

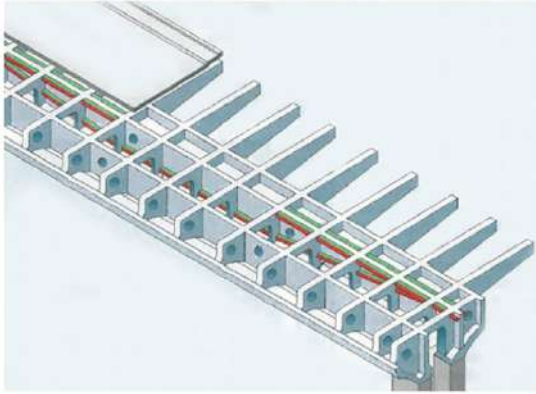
Det primära syftet med övervakningsprojektet var att bevaka brott orsakad av korrosion i kabelsträngar i spännarmeringen. Korrosion i bron har varit ett orosmoment för broägaren i flera år. Dock var det först när mindre omfattande förstörande provning genomfördes på konstruktionen som broägaren fick förståelse för hur illa situationen verkligen var. Anledningen till den omfattande korrosionen se Figur 10-16 ansågs vara den utökade användningen av tösalt. Bron var i början av sin livslängd utrustad med ett uppvärmningssystem för avisning. Systemet avaktiverades varpå tösalter började användas i större utsträckning. Genom implementering av ett AE-system ville broägaren få en uppfattning om hur bronns tillstånd förändrades över tid för att avgöra när och vilka typer av åtgärder som behöver vidtas. Det sekundära syftet med broövervakningen var att övervaka lagren i bron som var drabbade av korrosion. Bevakningen av lagren genomfördes inte med ett AE-system, och därför behandlas inte lagren vidare i presentation.



Figur 10-16 Korrosion på spännarmering och lager

10.10.3 Fallstudiens genomförande

Det beslutades att genomföra en långtidsbevakning med hjälp av ett AE-system. Framförallt söktes svar på korrosionens omfattning och mängden kabelbrott, samt vilka specifika platser som var drabbade. Det tog ca åtta veckor att utforma och installera systemet. Anledningen till installationstiden var hur dålig åtkomsten var för att placera ut sensorerna. Hammersmith Flyover är en lådbro se Figur 10-18 och sensorerna placerades inuti lådan som hade en liten inneslutande volym se Figur 10-17 (Mistras Group, 2018).



Figur 10-18 Hammersmith Flyover brons konstruktion (Mistras Group, 2018)



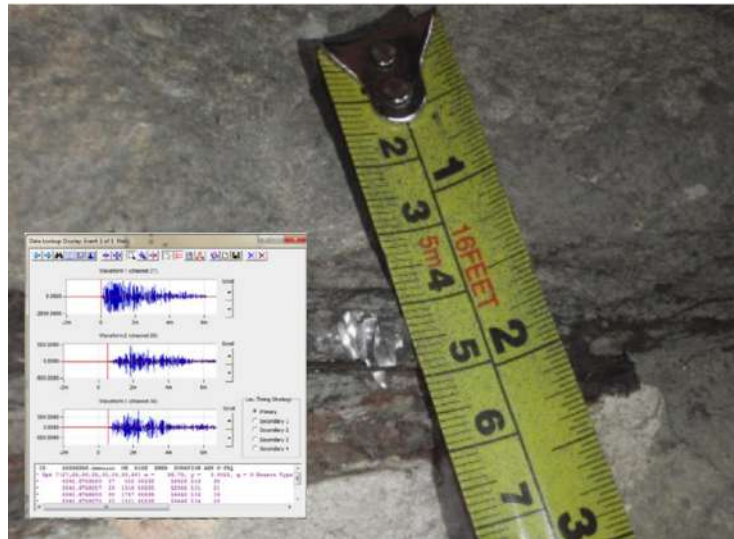
Figur 10-17 Sensor placering inne i lådan (Mistras Group, 2018)

AE-systemet installerades i juli 2010 och innehöll ca 300 separata AE sensorer som fästes mekaniskt på konstruktionen. Majoriteten av sensorerna var AE-sensorer som var inställda för att uppfatta brott på kabelsträngar i spännarmeringen. Systemet innehöll även ett antal sensorer för parametrisk indata och några traditionella sensorer t.ex. lutningsmätare. Sensorerna var kopplade med kablar till datainsamlingsenhet som placerades på det östra brofästet. Informationen registrerades i datainsamlingsenheten och skickades sedan via ett trådlöst bredbandssystem till Mistras Group som ansvarade för analysen av data (Webb, P.J, P, & C, 2014).

När installationen var färdig genomfördes ett praktiskt test där en av de synliga kabelsträngarna klipptes av för att se om systemet registrerade informationen korrekt. Systemet registrerade kabelbrottet och informationen skickades till Mistras Group (Mistras Group, 2018).

10.10.4 Fallstudiens resultat

De första 18 månaderna som systemet var aktivt upptäcktes nästan 400 brott på kabelsträngar. Nedan i Figur 10-19 visas ett strängbrott med ett måttband som storleksreferens, i samma bild visas hur AE vågen såg ut på datorn.



Figur 10-19 Kabelbrott och tillhörande ljudvågor som mättes av datainsamlingsenheten

Fallstudien resulterade i en försäkring för broägaren att konstruktionens korttidsfunktion inte var hotad. Det framgick dock att konstruktionens funktion över längre tid var hotad, därför beslutades det att utförligare förstörande provning skulle genomföras samt att en projektering över framtida reparationer skulle påbörjas.

Den förstörande provningen visade på så allvarliga konstruktionsbrister att bron var tvungen att stängas för trafik den 23:e december 2011 för akuta reparationsåtgärder (Mistras Group, 2018).

11 Sammanfattning av intervjustudien

11.1 Inledning

I detta kapitel så redovisas ett urval av intervjufrågorna och svaren från de olika intervjuobjekten. De olika intervjuerna presenteras var för sig och hela intervjun för varje intervjuobjekt finns bifogat i bilaga A.

11.2 Sammanfattning av intervju med Johan Silfwerbrand

Vilka är de vanligaste skadorna på betongbroar

De vanligaste skadorna är rost i armeringen, sprickor i betongen och uttjänade tätskikt.

Vilken skada tror du man kan övervaka med SHM

Sprickor vet Johan att man idag mäter och att det finns rapporter om att dynamiken och resonansen i broar övervakas.

En teknik som Johan tror på, är att använda drönare för okulär inspektion, det är just drönarnas lättmanövrering och förmåga att kunna ta sig till svåråtkomliga platser på bron för inspektion.

Drönarna skulle också kunna utrustas med sensorer för att utföra mätningar på plats. Med drönarna så skulle man då kunna upptäcka sprickor, frostsprängningar och rost i armering.

Om SHM ska implementeras, vem enligt dig skulle ansvara för utrustning och data

Det organ som har kapacitet och skulle kunna genomföra implementering av SHM är Trafikverket.

Om vi ska börja jobba med SHM så krävs det att intresset för att börja jobba med tekniken kommer från Trafikverket.

Tror du att det finns en ekonomisk vinning i att arbeta med SHM vid förvaltning av betongbroar

Ja, om man kan få systemen att fungera till hundra procent så tror Johan att det kan finnas en ekonomisk vinning med SHM.

Tror du att SHM är framtidens instrument för tillståndsbedömning

Johan är tveksam till SHM-konceptet, han lyfter problemet med att han än inte stött på något system som kan implementeras direkt och leverera fullt ut. Det har forskats i SHM tekniken sen 1980 och än har man inte kommit fram till fullt implementeringsbara lösningar, pga. all tidigare forskning så undrar Johan om man någonsin ska kunna lösa alla problem kring SHM.

11.3 Sammanfattning av intervju med Raid Karoumi

Finns det sensorer/system som inte används idag som du tror skulle göra stor nytta

Användningen av drönare är något som Raid tror kommer öka i framtiden. Då drönare kan ta sig till platser som är svåra att undersöka och att man kan utrusta drönare med sensorer så finns det potential i tekniken.

Japan och USA forskar mycket har kommit långt inom drönartekniken och säger att där har Sverige mycket att lära ifrån.

Raid lyfter fram behovet av fortsatt forskning och säger att KTH kommer starta ett mastersarbete 2020 om drönartekniken.

När det kommer till sensorer så kommer framtidens sensorer att vara placerade på fordon som kommer åka över bron och känna av bronns hälsa på det sättet. Något som är mer effektivt än att placera ut sensorer på varje bro.

Man kommer också använda sig mer av tvillingmodeller i BIM program där informationen från systemen visar sig i realtid på modellen.

Vad är problemen med att implementera SHM på bred front idag

Ett stort problem för att SHM ska implementeras är att det saknas direktiv från Trafikverkets sida.

Vilka broar är av intresse för övervakning och hur ska de olika entreprenörerna arbeta med SHM för Trafikverket.

Raid lyfter också fram problemet att det saknas kompetens inom SHM och framför allt inom dataanalys.

Om SHM ska implementeras på bred front, hur ska man då gå till väga

- Vem borde vara den drivande parten
Incitamentet för SHM måste komma ifrån Trafikverkets sida. De olika entreprenörerna och konsulter kan inte vara drivande. Entreprenörerna/konsulterna kan i dagsläget göra förfrågningar till Trafikverket att implementera SHM på de broar som dem förvaltar, men för att SHM ska få fotfäste så måste ett intresse finnas hos Trafikverket.
- Vem borde vara ansvarig för data och dess arkivering
Trafikverket ska ansvara för arkiveringen av den insamlade data precis som Trafikverket har arkivering av diverse handlingar av broar idag. Den insamlade data kan inte fastna hos enskilda parter då en osäkerhet finns i om dessa parter kommer finnas kvar längre fram i tiden och vara aktiva inom SHM. Då kommer framtida analyser av data bli omöjlig och en stor mängd data kommer att gå förlorad eftersom ingen vet vart den finns lagrad.

11.4 Sammanfattning av intervju med John Leander

Vilka brokonstruktioner är i störst behov av SHM

Kritiska broar som är i störst behov av SHM definierar John som broar där man vet att det finns skador eller broar som har en stor samhällskonsekvens kopplat till sig och som resulterar i stora samhällskostnader ifall de skulle sluta fungera och måste tillfälligt stängas av eller tas ur bruk. Som exempel lyfter John fram Essinge broarna, Älvsborgsbron eller Öresundsbron.

Det är inte intressant att instrumentera nya broar då brotts sannolikheten är väldigt liten och brons livslängd oftast är 120 år, därför är det inte möjligt att instrumentera broarna med sensorer vars livslängd i bästa fall är 20–25 år. Det är inte helt ovanligt att många sensorer enbart överlever 1 år då den stränga miljön i Sverige skadar eller slår ut sensorerna. Äldre broar med mindre kostsamma skador är inte heller av intresse att utrusta med sensorer, då kostnaderna för ett fungerande sensorsystem sällan understiger 500'000 SEK. Då är det helt enkelt billigare att utföra renoveringarna utan att först övervaka dem. Skulle samhällskostnaden för en reparation stiga väsentligt så kan det vara av intresse att först utrusta bron med ett sensorsystem för att kunna skjuta på reparationsingreppet in i framtiden så länge som möjligt.

Ett väldigt påkostat sensorsystem uppskattar John till 2'000'000 SEK eller mer. Kostnaderna för sensorsystemen ska endast fungera som riktmärken och den riktiga kostnaden för systemet måste bestämmas från fall till fall.

Hur kan SHM förlänga livslängden på broar

Idag görs konservativa antaganden när en bro ska bedömas pga. osäkerheten i storleken på lasterna som belastar bron samt brons verkningssätt. Det gör att den uppskattade kvarvarande livslängden på en bro kan underskattas och bron blir utdömd för tidigt.

SHM kan användas för att ge oss bättre förståelse för vilka laster som belastar den specifika bron samt brokonstruktionens verkningssätt, och det leder till en större säkerhet i bedömningen av brons kvarvarande livslängd och oftast till att livslängden kan förlängas.

Vad är livslängden på de olika sensorerna

Olika sensorer har olika livslängder och det framgår på återförsäljarnas hemsidor vilka livslängder som deras sensorer har. Men man ska dock vara kritisk till de redovisade livslängderna, många återförsäljare lovar livslängder på 20–25 år men det är inte ovanligt att vid instrumentering så slutar många sensorer att fungera efter första året i bruk. Det kan bero på många orsaker till varför sensorerna slutar fungera, de kan skadas vid montering, det svenska vinterklimatet är hårt ansträngande på sensorerna och dess tillhörande instrument.

De enskilda sensorerna är dock relativt billiga och ett sätt att övervinna dessa problem kan vara att helt enkelt räkna med att sensorer kommer att gå sönder och behövas byta ut. Det är något att tänka på när man instrumenterar en bro med sensorer att sensorsystemet i sig självt kommer behöva underhåll och reparationer i framtiden.

Tror du att det finns en ekonomisk vinning i att arbeta med SHM vid förvaltning av betongbroar

En stor ekonomisk vinning kan vi uppnå genom att förlänga vårt brobestånds livslängd. Det går att göra genom att samla faktiska data om brokonstruktionernas lasteffekter och hälsa så vi kan få en bättre förståelse för hur broarna faktiskt mår och det leder i många fall till att vi kan förlänga broarnas livslängder. Gör vi istället konservativa antaganden om lasteffekter utan att faktiskt vara på plats och mäta fordonsmängden och dess belastning, då riskerar många broar att bli utdömda. Det är inte miljövänligt eller kostnadseffektivt att riva och bygga om vårt brobestånd. Vi måste rädda våra broar nu och SHM är ett bra verktyg att ha till hands.

11.5 Sammanfattning av intervju med Viktor Ansnaes

Vilka skador på betongbroar/samverkansbroar stöter du på mest under broinspektioner

De allra vanligaste skador jag stöter på i betongbroar är sprickor. Sprickor uppstår på många delar av en bro men de flesta sprickorna är inte farliga utan en naturlig del i betongens åldrande. Många plattramar får dragsprickor mitt i plattan men de är sällan akuta. Spjälkning är också ofta förekommande och är en konsekvens av armeringskorrosion. Armeringskorrosion är i sig en skada men framförallt en skademekanism för andra skador. Det finns standardiserade förfarande om hur man ska uppskatta armeringskorrosion i en betongkonstruktion. Det hade dock vart bra om man skulle kunna utveckla ett SHM system som automatiskt kan utvärdera armeringskorrosion.

En enkel metod för att minimera saltskador på betongkonstruktioner är att klä in konstruktionen med skydd så som plåtar. Ett problem med det dock är att betongen inte går att okulärt inspektera längre. Andra vanligt förekommande skador på en betongbro är, plogskador, korrosion på räcken samt skador som uppstår pga. bristfälligt underhåll så som grusansamling vid lager. Detta skulle lätt kunna motverkas med väl utfört underhåll.

Vilka betongbroskador är viktigast efter upptäckt att hålla under fortsatt uppsikt

De absolut viktigaste skadorna att hålla under uppsikt efter upptäckt är belastningsskador så som skjvsprickor. Det är för att dem påverkar bron verknings sätt. Ett väldigt intressant område att få till ett fungerande SHM system är för att övervaka just sprickor vid upplag, för att tidigt kunna identifiera skjvsprickor och att sen övervaka skjvsprickornas utveckling

Spjälkning är också viktigt att övervaka. Det är för att spjälkning kan leda till belastningsskador då armeringsfunktionen försämras som i sin tur kan leda till att broarnas tonnage behöver minskas.

Har du någon erfarenhet av att använda SHM

Ja, jag har använt och experimenterat lite med manuella sprickmätare och tätskiktsmätare. Men i mitt dagliga arbete använder jag mig sällan av mätinstrument. Mest jobbar vi med okulär inspektion.

Tror du dock att du skulle ha nytta av SHM tekniken i ditt vardagliga jobb?

Absolut, jag tror tekniken har en framtid inom broinspektion, men kanske måste inte fullt automatiserade sensorsystem vara det första som vi försöker implementera. Många gånger i mitt vardagliga arbete så skulle en enkel kamera som sitter fastmonterad på en bro vara ett bra hjälpmedel. Det finns många broar där vi måste stänga av trafiken för att kunna utföra en inspektion, exempel på detta är broar över trafikerade vägar. Men där en monterad kamera skulle göra som störst nytta är på broar över järnvägsspår. Det är för att, om vi ska kunna inspektera bron som går över järnvägsspåret så måste strömledarna stängas av och det leder till att inget tåg kan passera medan vi utför vår inspektion. Hade man då haft en eller flera kameror monterade på bron. Då skulle man kunna utföra en inspektion med hjälp av kamerorna. Ser man indikationer på att skador finns på bron, då kan man stänga av strömledarna och utföra en mer grundlig inspektion. Ser man inga indikationer på skador då behövs ingen vidare inspektion.

Kameror skulle också vara väldigt hjälpsamma inne i lådbroar, oftast finns ingången till lådbron placerad över farbanan och vi är tvungna att stänga av vägen för att kunna ta oss in. Det leder till högre samhällskostnader och irritation hos bilförarna som fastnar i köer. Hade man då utrustat lådbron med kameror så skulle man kunna utföra inspektionen på samma sätt som vid broar över järnvägsspår.

Tror du Trafikverket skulle godkänna en inspektion utförd med kamera på det sättet som du beskriver?

Ja, vi använder oss av kameror idag vid undervattensinspektioner. Där vi först skickar ner en dykare för att undersöka skadorna närmare efter att kamerorna har identifierat att en skada finns.

12 Resultat

12.1 Inledning

I och med att arbetets huvudmetod är litteraturstudie och studie av teori, avviker redovisning av genomförande och resultat från KTH ABE-mallen. I detta kapitel presenteras en överskådlig sammanställning av resultaten samt vart resultaten härstammar ifrån. För en mer utförlig genomgång av resultaten och den teoretiska referensramen så hänvisas läsaren till de enskilda kapitlen

12.2 Litteraturstudie

SHM-system som kan användas som komplettering vid tillståndsbedömning:

- Akustisk emission se kapitel 10.
- SOFO se stycke 9.5.1
- MuST se stycke 9.5.2

SHM tekniker som finns idag är:

- Accelerometrar se stycke 8.3
- Trådtöjningsgivare se stycke 8.4
- Lutningsmätare se stycke 8.5
- Linear Variable Differential Transformers se stycke 8.6
- MEMS se stycke 8.7
- Akustisk emission se kapitel 10
- Fiberoptiska sensorer se kapitel 9

Skadornas skademekanismer:

- Armeringskorrosion föranlett av karbonatisering se stycke 5.3.3
- Armeringskorrosion föranlett av kloridinträngning se stycke 5.3.3
- Frostangrepp se stycke 5.3.1
- Saltfrostangrepp se stycke 5.3.2
- Sulfatangrepp se stycke 5.3.4

12.3 Intervjuer

Inspektionstyper:

- Huvudinspektion se stycke 4.4
- Särskild inspektion se stycke 4.4
- Allmän inspektion se stycke 4.4

Inspektionsmetoder:

- Okulär inspektion se stycke 4.3.1
- Oförstörande provning se stycke 4.3.2
- Förstörande provning se stycke 4.3.3

De vanligaste skadorna på betongbroar:

- Sprickor i betong se stycke 5.2.1
- Armeringskorrosion se stycke 5.2.2

SHM teknik som kan användas som komplement vid tillståndsbedömning:

- Akustisk emission se kapitel 10
- Fiberoptik se kapitel 9

13 Diskussion och Analys

13.1 Intervjuer

I intervjun med J., Silfwerbrand (Silfwerbrand, 2019) framgick det att vanligt förekommande skador på betongbroar är sprickor i betongen och armeringskorrosion. Dessa två skador lyfter V., Ansnaes också fram som vanligt förekommande, V., Ansnaes säger att sprickor på betongen är de vanligaste skador som uppmärksammas under tillståndsbedömningar av en betongbro. Både V., Ansnaes och J., Silfwerbrand lyfter fram att det finns andra skador som är vanligt förekommande, t.ex. bristfälligt tätskikt, plogskador, korrosion på räcken samt skador som uppstår pga. bristfälligt underhåll så som grusansamling vid lager.

I intervju med både R., Karoumi och J., Leander lyfts AE fram som en SHM teknik som kan användas som komplettering vid tillståndsbedömning. J., Leander säger att det finns forskning utförd för att mäta armeringskorrosion med akustisk emission men att det har visat sig vara en svårighet. R., Karoumi berättar att fiberoptik kan användas för sprickor i betongkonstruktioner.

J., Leander anser att användning av SHM kan förlänga livslängden på konstruktioner. Idag görs det ofta konservativa antaganden på lasteffekterna på broar vilket resulterar i att broars kvarvarande livslängd underskattas. Den direkta kopplingen till hur broars livslängd kan förlängas med SHM är att man kan mäta de faktiska lasteffekterna på broarna och utföra bättre uppskattningar av broars kvarvarande livslängd och ett exempel på detta är Gamla Lidingöbron. Det säger J., Leander leder till en ekonomisk vinning. Genom att förlänga det svenska vägbrobeståndets livslängd så går det att reducera kostnaderna och behovet av nybyggnation minskar. Det leder samtidigt till mindre miljöpåverkan. J., Silfwerbrand tror också att det finns en ekonomisk vinning i att arbeta med SHM, om man kan lösa alla problem som finns med att implementera SHM. J., Silfwerbrand menar att man har forskat på SHM sedan 80-talet och än har han inte satt ett system som kan leverera fullt automatiserad tillståndsbedömning av broar. Det gör att J., Silfwerbrand håller sig tveksam till om SHM är framtidens instrument. Så väl utvecklade SHM-system har inte heller J., Leander satt. J., Leander tror dock att inom en snar framtid så kommer det finnas SHM-system som kan utföra automatiska tillståndsbedömningar av broar.

J., Leander lyfter två problem för att konsulter och entreprenörer ska börja implementera SHM. De ena problemet är att det saknas normer för hur SHM skall implementeras. Det andra problemet är att det saknas incitament från konsulternas och entreprenörernas sida. De har idag väl etablerade tillvägagångssätt för att utföra tillståndsbedömningar och ser ingen nytta av att använda SHM som ett komplement vid tillståndsbedömning.

R., Karoumi pekar också på att det saknas direktiv från Trafikverkets sida hur användningen av SHM ska gå till. Ett annat problem som R., Karoumi menar på finns är att det saknas kompetens inom SHM och framför allt inom dataanalys.

I intervjun med V., Ansnaes i kom det fram att många gånger inte behövs fullt utvecklade SHM-system som komplement. Många gånger skulle inspektörernas arbete underlättas om broarna hade vart utrustade med kameror. V., Ansnaes berättar att ett flertal broar har en stor samhällskostnad kopplad till sig vid inspektioner. Broar som han lyfter fram är, broar över järnvägsspår och lådbroar placerade över farleder. Problemet är att trafiken, vare sig det är tågtrafik eller biltrafik måste stängas av eller kraftigt reduceras för att inspektionerna ska kunna utföras. Hade då dessa broar vart utrustad med kameror så skulle en inspektion kunna utföras med kamerorna och vid indikationer på skador så utförs en utförligare inspektion där trafiken stängs av. Finns inga indikationer på skador då finns inget behov av en utförligare inspektion och man slipper stänga av trafiken och samhällskostnaden hålls till ett minimum. En annan teknik som togs upp i intervjuerna och var drönaner tekniken, drönare var intressanta då de är lätta att manövrera samt deras kapacitet att utrustas med instrument. J., Silfwerbrand lyfter att det finns försök gjorda att utrusta drönare med kameror och det skulle vara intressant att undersöka vilka sensorer en drönare kan utrustas med och producera resultat som är relevanta för tillståndsbedömning av broar. R., Karoumi säger att drönartekniken använts på många

projekt i både Japan och USA. I dessa länder har utvecklingen kommit långt och R., Karoumi menar att här har Sverige mycket kvar att lära. R., Karoumi kommer att handleda ett mastersarbete med start år 2020 som ska undersöka drönarteknikens potential inom SHM.

13.2 Litteraturstudier

I litteraturstudien hittades källor som styrkte den information som kom fram under intervjuerna. (Vägverket, 1994) är en bok som Trafikverket publicerat. Boken behandlar kortfattat vilka skador som är vanligt förekommande på betongbroar samt hur en broinspektion går till. Här anges bl.a sprickor i betongen och armeringskorrosion som vanligt förekommande. Samma inspektionstyper och inspektionsmetoder som V., Ansnaes i (Ansnaes, 2019) beskriver, tas upp i Trafikverkets bok. Hur en tillståndsbedömning går till beskrivs i (Pettersson & Hännestrand, 2017). I (Pettersson & Hännestrand, 2017) anges sprickor i betong som vanligt förekommande skador på en betongbro, armeringskorrosion tas fram som en skada som förekommer på betongbroar men de säger inget om hur vanligt förekommande skadetyper är. Det genomfördes en doktorsavhandling av G., Racutanu (Racutanu, 2000) på KTH som syftade till att utveckla nedbrytningsmodeller. I rapporten redovisar G., Racutanu korrosion som den andra vanligaste rapporterade skadan på broar och sprickor i betongen hamnar på femte plats. Undersökningen gjordes genom att gå igenom 353 broar belägna på 23 olika vägstråk i Sverige.

Litteraturstudien lyckades identifiera tre olika SHM-system. Dessa var AE-, MuST- och SOFO-system. AE kan användas för detektering av kabelbrott i spännarmerade konstruktioner samt detektering och övervakning av sprickor i betong, två fallstudier är presenterade som visar på hur AE kan användas för dessa skador, de fallstudierna är; (Parmar & Sharp, 2010) och (Mistras Group, 2018). SOFO-systemet kan användas för detektering och övervakning av sprickor och två fallstudier presenteras som visar på hur SOFO-systemet kan användas för dessa skador, de fallstudierna är; (Enckell, 2011) och (Inaudi, Casanova, & Glisic, 2001). Fallstudierna visar att SHM-systemen har använts och kan användas som komplement vid tillståndsbedömning samt vilka resultat som idag kan förväntas av ett SHM-system. Litteraturstudien lyckades inte identifiera en fallstudie av MuST-systemet, det framgick i litteraturundersökningen att systemet kan användas för sprickövervakning men är inte optimerat för sprickdetektering.

13.3 Generell Diskussion

Tillståndsbedömning är en viktig del av underhållet på infrastrukturen och kräver stora resurser. Som ett försök till att effektivisera tillståndsbedömning bedrivs forskning inom SHM. Många olika SHM-system utvecklats och provats, både i labbmiljö och genom fallstudier på broar. Flera system visar lovande resultat, men än finns inga utvecklade SHM-system som kan utföra automatiserade tillståndsbedömningar på betongbroar, det gör att traditionella inspektioner fortfarande krävs. De presenterade systemen kan användas enskilt och har gjorts på ett flertal projekt med goda resultat. SHM-tekniken fungerar dock som bäst när ett flertal system används tillsammans. Då erhålls en mer övergripande kunskap om skadornas tillstånd och brons verkningssätt i helhet. Vilket tillsammans med en traditionell inspektion kan resultera i en bättre tillståndsbedömning av bron, och i många fall kan brons kvarvarande livslängd förlängas.

En betongbro utsatt för en mängd olika skador, då tid inte fanns att undersöka alla skador som kan uppstå i en betongbro så gjordes ett urval av olika skador som många gånger togs upp i intervjuerna som vanligt förekommande. SHM-tekniken som valdes att studera vidare identifierades också genom intervjuer. Om intervjuer hade genomförts med andra intervjuobjekt, är det möjligt att andra skador hade identifierats som vanligt förekommande eller att andra SHM-tekniker framkommit som bra komplement vid tillståndsbedömning.

Det är intressant att se skillnaderna i inställning kring SHM. Flera av de personer som intervjuades för studien var positiva till användningen av SHM i framtiden och trodde att tekniken har möjlighet att göra stor nytta vid tillståndsbedömning. Medan några av intervjupersonerna var skeptiska till att tekniken någonsin kommer bli tillräckligt utvecklad för en bredare implementering. Det kunde dock

observeras att många av intervjupersonerna såg samma problem som behövdes övervinnas innan en bredare implementering är möjlig. I fallstudierna presenterades flera fall över hur implementering har gått till utomlands. Det var intressant att notera att hur flera av aktörerna i dessa var specialiserade konsulter inom SHM. Det visar att SHM är en större bransch utomlands och att det finns ett användningsområde samt behov av teknologin. Det gick dock att se att man valde att utrusta konstruktionerna med ett SHM system först efter att man hade identifierat ett specifikt problem eller hade fattat en misstanke om ett problem som man sökte lösning på. Det visar att SHM är ett bra komplement att använda vid tillståndsbedömningar och vid specifika problem samt att konstruktionerna inte utrustas med SHM i förebyggande syfte.

14 Slutsats

14.1 Generella slutsatser

Rapporten uppfyller målet genom att vanligt förekommande skador som uppstår i en betongbro redovisas samt att deras skademekanismer beskrivs. Skadorna är sprickor i betong och armeringskorrosion. Rapporten uppfyller målet genom att tre olika system som kan användas som komplement vid tillståndsbedömning har identifierats och presenterats samt visat på systemens användningsområden. För detektering och övervakning av sprickor i betong så kan SOFO-system och AE-system användas. AE-system kan också användas för att upptäcka kabelbrott i spännarmering, orsakad av armeringskorrosion. MuST-system kan användas för sprickövervakning men är inte optimerad för sprickdetektering. Målet att kartlägga hur SHM-systemen kan användas som komplement vid tillståndsbedömning uppfylls genom att studien har identifierat fyra olika fallstudier som påvisar hur SHM-systemen kan användas vid detektering och övervakning av armeringskorrosion och sprickor i betong. Fallstudierna visar att det går att använda SHM-tekniken som ett komplement vid tillståndsbedömning och SHM-tekniken har använts på just det sättet på flera projekt både globalt och i Sverige. Genom att använda sig av de identifierade SHM-systemen, erhålls en djupare kunskap om tillståndet på sprickorna i betongen och armeringskorrosionen. Systemen bidrar också till att ge en bättre förståelse för konstruktionens verkningssätt och tillstånd i helhet.

Det leder till slutsatsen att SHM kan användas som ett komplement vid tillståndsbedömningar men man kan inte utföra automatiserade tillståndsbedömningar idag.

14.2 Förslag på fortsatta studier

Författarna skulle vilja rekommendera fortsatta studier på de skador som framkom i intervjuerna som vanligt förekommande men som inte behandlas i detta examensarbete. Det är intressant att se om det finns SHM-system utvecklade för att detektera eller övervaka dessa skador samt om systemen kan användas som komplement vid tillståndsbedömning. Författarna vill också rekommendera fortsatta studier på kamerors potential vid tillståndsbedömning av broar samt hur drönartekniken kan användas vid tillståndsbedömning.

Frågeställningar för identifierade vanligt förekommande skador som inte har behandlats i denna studie:

- Vilka SHM-system kan användas som komplement för att upptäcka och övervaka skadorna vid tillståndsbedömning?
- Hur implementeras SHM-system och vilken utrustning krävs?

Frågeställningar för kameror

- Vilka kameror kan användas för att instrumentera en bro?
- Vilka broar har störst användning av att utrustas med kameror?
- Vem ansvarar för installation?
- Finns det en samhällsekonomisk vinning i att utrusta broar med kameror?

Frågeställningar för drönartekniken

- Vilka sensorer kan en drönare utrustas med?
- Vilka drönare är intressanta att använda vid tillståndsbedömning av broar?
- På vilket sätt kan drönare underlätta inspektörers arbete vid tillståndsbedömning av broar?

15 Rekommendationer

Författarna anser att på broar som har stor samhällsekonomisk kostnad kopplad till sig finns det en vinning att göra med SHM.

Då SHM idag inte är fullt utvecklat är författarnas rekommendationer till byggbranschen och de enskilda företagen som arbetar med tillståndsbedömning att fortsätta övervaka utvecklingen av teknologin.

Författarna tror att SHM har en framtid inom byggbranschen men det finns hinder kvar som måste övervinnas innan implementering av SHM kan ske på bred front.

Referenser

- Al-Azzawi, A. (2017). *Fibre Optics: Principles and Advanced Practices* (2:a upplagan uppl.). New York: Taylor & Francis Group.
- Ansnaes, V. (den 26 april 2019). Intervju med Viktor Ansnaes, Broinspektör på ÅF i Stockholm. (J. Le Guillarme, Intervjuare)
- Aronsson, B., Bolin, J.-O., Ericsson, K., Eriksson, B., Jansson, K., Mildton, B., . . . Sundèn, H. (1993). *broinspektionshandboken* (Vol. 2). (L. Lindblad, Red.) Solna: Svensk byggtjänst.
- Aronsson, F., & Larsson, O. (2007). *Sprickvidd nära armeringsjärn i betongbalkar*. Lund: Lunds Tekniska Högskola.
- Awaring, & Talk. (den 25 Mars 2011). *The Industrial Design Engineering Wiki*. Hämtat från http://wikid.io.tudelft.nl/WikID/index.php/File:Input_env_figure_2.jpg den 12 April 2019
- Brown, P. (u.å). *Fiber Optic Applications for Deformation Monitoring*. Hämtat från SMARTEC: https://www.marshall.edu/cegas/geohazards/2016pdf/S7/3_Polly%20Brown%20-%20Fiber%20Optic%20Applications%20for%20Deformation%20Monitoring.pdf den 2 Maj 2019
- Byfors, K., & Tuutti, K. (1994). Armeringskorrosion. i *Betonghandboken* (Vol. 2, ss. 785-804). Stockholm: Svensk Byggtjänst.
- Cai, C., & Nair, A. (2010). Acoustic emission monitoring of bridges: Review and case studies. i *Engineering Structures* 32 (Vol. 6). Louisiana, Louisiana, United States.
- Comisu, C. C., Taranu, N., Boaca, G., & Scutaru, M. C. (2017). Structural health monitoring system of bridges. *X International Conference on Structural Dynamics, EUROLYN 2017* (ss. 2054-2059). Romania: Elsevier Ltd.
- COST. (den - - u.å). *COST mission*. Hämtat från COST European Cooperation in Science & Technology: <https://www.cost.eu/who-we-are/mission-vision-and-values/> den 2 Maj 2019
- Enckell, M. (2006). *Structural Health Monitoring using Modern Sensor Technology - Long-term Monitoring of the New Årsta Railway Bridge*. Kungliga Tekniska Högskolan. Stockholm: KTH.
- Enckell, M. (2011). *Lessons Learned in Structural Health Monitoring of Bridges Using Advanced Sensor Technology*. KTH. Stockholm: KTH.
- Fagerlund, G. (1992). *Betongkonstruktioners beständighet: en översikt* (Vol. 3). Cementa.
- Fredèn, J., & Olsson, F. (2012). *Utförande och upphandling av brounderhåll: En studie av Stockholms stads broar*. KTH, Department of Civil and Architectural Engineering. Stockholm: KTH.
- Gostautas, R., & Watson, J. (2018). *How To Utilize Long-Term Structural Health Monitoring (SHM) Systems To Reduce Costs and Prevent Catastrophic Damages*. (Mistras, Redaktör, & R. a. magazine, Producent) Hämtat från Youtube: <https://www.youtube.com/watch?v=KN3rZfZyw0k&t=1s> den 9 April 2019
- Hejll, A. (2007). *Civil Structural Health Monitoring Strategies, Methods and Applications*. Luleå tekniska universitet, Institutionen för samhällsbyggnad och naturresurser. Luleå: Luleå tekniska universitet.
- Hejll, A., & Täljsten, B. (2005). *Civil Structural Health Monitoring (CSHM) Tillståndsbedömning genom mätning anpassad för anläggningskonstruktioner*. Institutionen för samhällsbyggnad, Avdelningen för byggkonstruktion. Luleå: Luleå tekniska universitet.
- Huang, M., Jiang, L., Liaw, P. K., Brooks, C. R., Seeley, R., & Klarstrom, D. L. (1998). Using Acoustic Emission in Fatigue and Fracture Materials Research. *JOM*, 50(11).
- Inaudi, D., & Glisic, B. (2008). OVERVIEW OF FIBRE OPTIC SENSING APPLICATIONS TO STRUCTURAL HEALTH MONITORING. *measuring the changes* (ss. 1-10). Lissabon: LNEC.
- Inaudi, D., Casanova, N., & Glisic, B. (2001). Long-term deformation monitoring of historical constructions with fiber optic sensors. *3 rd International Seminar on structural analysis of historical constructions* (ss. 7-9). Guimaraes: SMARTEC SA.

- Inc, P. P. (2019). *Why are water repellents needed?* Hämtat från Professional Products of Kansas Inc.: <http://watersealant.com/index.php/why-are-water-repellents-needed/> den 16 Maj 2019
- Jones, P. (den 24 Maj 2018). *Senskin*. Hämtat från Senskin: <http://www.kgm.gov.tr/SiteCollectionDocuments/KGMdocuments/Projeler/ABProjeleri/7-2nd%20workshop%20-%20monitoring%20in%20the%20UK.pdf> den 5 Maj 2019
- Karoumi, R. (den 4 April 2019). Intervju med Raid Karoumi, Professor vid institutionen för byggvetenskap på Kungliga Tekniska Högskolan i Stockholm. (J. Le Guillaume, & J. Lindstam, Intervjuare)
- Laboratories, C. E. (den 11 Juni 2008). *Bridge Health Monitoring with Fiber Optic Sensors*. Hämtat från http://www.clevelandelectriclabs.com/wp-content/uploads/2016/03/Fiber-Optic-Sensors_White-Paper.pdf den 26 April 2019
- Larsson, N.-E. (den 28 November 2011). *Fotosidan*. Hämtat från Nisseblogg: <https://l.facebook.com/l.php?u=https%3A%2F%2Fwww.fotosidan.se%2Fblogs%2Fnisse07%2Farstabroar-i-skymning.htm%3Ffbclid%3DIwAR0gXIFRvE6oHL8cNcihI4dtxOi89snOeTriGhJRGbO07aGWH9DqTGtnPuU&h=AT0vTYI3U5w1GTUHY7vamJ92pJFFueyrKfKcFY-rR770viwP9gNyFwXAaHywUBvLPujZPde-> den 3 Maj 2019
- Leander, J. (den 24 April 2019). Intervju med John Leander, Lektor i konstruktionsteknik och docent inom brobyggnad vid institutionen för byggvetenskap på Kungliga Tekniska Högskolan i Stockholm. (J. Le Guillaume, & J. Lindstam, Intervjuare)
- Lind, C., & Wikslund, M. (2011). *Är den högsta tillståndsklassen. Konstruktionsdelen anses vara bristfällig inom 3 år. Skadan ska följas upp minst vart 3:e år om den tillhör en bärande eller skyddande konstruktionsdel. En skadeutredning ska påbörjas inom 3 månader om skadan tillhör en bä.* Linköping University. Linköping: Linköping University.
- Lindegård, L., & Markungar, D. (2014). *Inventering av skador och nedbrytningsmekanismer hos betongbroar i vägmiljö*. Chalmers University of Technology. Göteborg: Chalmers University of Technology.
- Liptai, R., Harris, D., & Tatro, C. (1972). *An Introduction to Acoustic Emission*. USA: American Society for Testing and Materials.
- López-Higuera, J., Cobo, A., Quintela, A., & Madruga, F. (den 5 November 2010). Fiber optics in Structural Health Monitoring. *Proceedings of SPIE - The international Society for Optical Engineering*, ss. 1-10.
- López-Higuera, J., Rodriguez, L., Quintela, A., Cobo, A., Madruga, F. J., Conde, O. M., . . . Mirapeix, J. (2010). Fiber optics in structural health monitoring. *Photonics Asia* (ss. 1-10). Beijing: SPIE Digital Library.
- Mattsson, H.-Å. (2008). *Integrated Bridge Maintenance Evaluation of a pilot project and future perspectives*. Stockholm: KTH.
- Mistras Group. (den 3 Maj 2018). *Critical Structural Health Monitoring of Hammersmith Flyover*. Hämtat från Mistras Group: <http://mistrasgroup.co.uk/wp-content/uploads/2018/03/Hammersmith-Case-study-05.03.2018.pdf> den 29 April 2019
- MISTRAS Group, I. (2019). *Physical Acoustics*. Hämtat från Mistras Group: <https://www.physicalacoustics.com/by-product/0-2-4/> den 18 April 2019
- Nilsson, M., & Gardner, E. (2017). *Möjligheter med Georadarteknik (GPR) för kvalitetssäkring av packningsarbeten vid beläggning och anläggningsarbete*. Göteborg: CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA.
- Nilsson, U. (den 29 April 2019). *RBro- och anläggningsunderhåll*. Hämtat från Romboll: <https://se.ramboll.com/tjanster/transport/broar/bro-och-anlaggningsunderhall> den 26 April 2019
- Parmar, D., & Sharp, S. (2010). *Short-Term Evaluation of a Bridge Cable Using Acoustic Emission Sensors*. Virginia: Virginia Transportation Research Council.
- Pettersson, F. (2014). *TVÄRKRAFTSDIMENSIONERING AV ARMERAD BETONG: En utredning av beräkningsförfarandet*. Uppsala: Institutionen för teknikvetenskaper, Tillämpad mekanik, Byggteknik, Uppsala Universitet.
- Pettersson, M., & Hännestrand, S. (2017). *Broförvaltning: En studie av beslutsfattandet kring brounderhållsarbeten*. Stockholm: Tyréns AB .

- Racutanu, G. (2000). *The Real Service Life of Swedish Road Bridges - A case study*. Stockholm: KTH. Ri.se. (den 27 Mars 2019). *Skadestredning av armerad betong*. Hämtat från Ri.se:
<https://www.ri.se/sv/utbildning/skadestredning-av-armerad-betong> den 17 Maj 2019
- Rombèn, L. (1997). Frostangrepp. i *Betonghandboken* (Vol. 3, ss. 809-847). Solna: Svensk byggtjänst.
- SAFI, M. (den 20 Mars 2014). *FOLKBRO*. Hämtat från BaTMan Bridge & Tunnel Management:
https://l.facebook.com/l.php?u=http%3A%2F%2Ffolkbro.com%2Fwordpress%2Fwp-content%2Fuploads%2F2015%2F07%2FBaTMan.pdf%3Ffbclid%3DIwAR2a0YxjTqMN5_CFZHaURtAt5LX_p4GTzoRLtsTdlRvt5tTd2pD6oEfd86s&h=AT0vTYI3U5w1GTUHY7vamJ92pJFFueyrKfKcFY-rR770viwP9gNyFwXAaHywUBvL den 9 Maj 2019
- Sakurambo. (den 2 Juli 2008). *File:Fiber Bragg Grating-en.svg*. Hämtat från
https://en.wikipedia.org/wiki/File:Fiber_Bragg_Grating-en.svg den 27 April 2019
- Sharma, U., & Wei, X. (2013). Fiber Optic Interferometric Devices. i J. U. Kang (Red.), *Fiber Optic Sensing and Imaging* (ss. 29-53). New York: Springer.
- Silfwerbrand, J. (den 3 April 2019). Intervju med Johan Silfwerbrand, Professor vid Kungliga Tekniska Högskolan i Stockholm och prefekt för institution för byggvetenskap vid Kungliga Tekniska Högskolan i Stockholm. (J. Lindstam, Intervjuare)
- SMARTEC. (den 5 Maj 2009). *STANDARD DEFORMATION SENSOR*. Hämtat från 10.1010 SOFO: file:///Users/Leguillarme/Desktop/Extern_SAFIBRA_SMARTEC_SofoDefSensor_datasheet_EN.pdf den 14 Maj 2019
- SMARTEC. (u.å). *MuST FBG Deformation Sensor*. Hämtat från MuST: <https://smartec.ch/wp-content/uploads/sites/2/2017/01/12.1010-MuST-FBG-Deformation-Sensor.pdf> den 7 Maj 2019
- SMARTEC. (u.å). *SOFO Lite Reading Unit*. Hämtat från COST EFFECTIVE FIBER OPTIC INTERROGATOR IDEAL FOR SMALL PROJECTS: <https://smartec.ch/en/product/sofo-lite-reading-unit/> den 8 Maj 2019
- Törnwall, M. (den 21 Augusti 2018). *www.svd.se*. Hämtat från Infrastrukturen förfaller - så många miljarder behövs: <https://www.svd.se/infrastrukturen-forfaller--sa-manga-miljoner-behovs> den 25 April 2019
- Timwether. (den 16 September 2008). *Totalreflektion i en enkel optisk fiber*. Hämtat från <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=4795736> den 11 April 2019
- Transportation, O. D. (den 15 November 2017). *Oregon Department of Transportation*. Hämtat från Flickr:
https://l.facebook.com/l.php?u=https%3A%2F%2Fwww.flickr.com%2Fphotos%2Foregondot%2F39179895811%3Ffbclid%3DIwAR0CBis6HR2AInm7rvPRW-CEPjDTwIRjOMoQ6r_802aKeKxuQw3Oah5Yn2s&h=AT0vTYI3U5w1GTUHY7vamJ92pJFFueyrKfKcFY-rR770viwP9gNyFwXAaHywUBvLPujZPde-tjr3xewKeF2gx den 28 Maj 2019
- Vägverket. (1994). *BRO HANDBOK FÖR BROINSPEKTION*. Borlänge: Vägverket.
- Vallen systeme. (2015). Hämtat från <http://www.vallen.de/>: <http://www.atgndt.com/wp-content/uploads/2016/01/vallen-amsy-6-ae-system-desc.pdf>
- Webb, G., P.J, V., P, F., & C, M. (den 3 juni 2014). Analysis of structural health monitoring data from Hammersmith Flyover. *Journal of Bridge Engineering*, 19(6).
- Wenzel, H. (2009). *Health Monitoring of Bridges*. Vienna: John Wiley and Sons.
- Wild, G., & Hinckley, S. (2011). Distributed Optical Fiber Smart Sensors for Structural Health Monitoring. i F.-K. Chang, & F.-K. Chang (Red.), *Structural Health Monitoring 2011 Condition-based Maintenance and Intelligent Structures* (2 uppl., ss. 2050-2057). Stanford: DEStech Publications, Inc.

Bilaga A Redogörelse av intervjuer

Bilaga A1 Redogörelse av intervju med Johan Silfwerbrand 3/4–19

Johan Silfwerbrand har blivit tillfrågad att medverka i intervjun på grund av sin tidigare anställning vid CBI betonginstitutet, samt publicerat många artiklar inom brokonstruktion och har ett intresse för broreparationer.

Presentation av Johan Silfwerbrand

Johan Silfwerbrand har arbetat med betong sedan civilingenjörsexamen från väg och Vattenbyggnad vid KTH 1982. Fokus har legat på brobanepplattor. Johan var anställd hos CBI Betonginstitutet som forskare 1991–1995 och sedan VD för CBI 2002–2013.

Johan är professor vid KTH sedan år 2000 och prefekt för institution för byggvetenskap vid KTH sedan 2014.

Vilka är de vanligaste skadorna på betongbroar

De vanligaste skadorna är rost i armeringen, sprickor i betongen och uttjänade tätskikt.

Ser man en korrelation mellan betongbroars produktions år och skador

Johan talar om tre tidsepoker dessa är, 1940–1960, 1960–1980 och 1980 fram till idag.

Johan säger att det finns en korrelation mellan produktionsår och skador. Tittar man på broar byggda runt 1940 så kan man se på de broar som finns kvar att de oftast är i ett bra tillstånd och är väl konstruerade ifrån början. Dåtidens konstruktörer tänkte inte så mycket på att spara in på resurser utan konstruerade broarna för att hålla en lång tid.

Rör man sig framåt i tiden under 1960 och 1970-tal så upplever Johan att en mer slit och släng-kultur utvecklades bland beställare och konstruktörer. Broarna skulle byggas snabbt då Sverige hade ett stort behov av ny infrastruktur, samtidigt som det skulle kosta så lite som möjligt. Detta ledde till att kvalitén inte alltid blev optimal. Dessa broar uppvisar ett stort behov av underhåll idag.

Johan säger att runt 1980 så förbättrades byggnormerna för brokonstruktioner vilket har lett till en högre standard i våra nyproducerade broar. Dessa broar uppvisar inte skador i lika stor utsträckning.

Vilka brodelar drabbas mest av skador

Johan ser att de brodelar som visar på flest skador är, stöd, vägbanor och kantbalkar. Vilka skador som uppstår beror till stor del på i vilken miljö, bron befinner sig. Broar i vägmiljö uppvisar ofta skador i stöd och kantbalkar till följd av tösaltet som används för avisning av vägarna. Vägbanans skador beror ofta på vilken typ av trafik som trafikerar bron men även för farbanorna så är saltningen ett stort problem. Pelare på broar över saltade vägar är också ett stort problem. I vägbanorna handlar det mycket om tätskikten som är svåra att kontrollera och har en kortare livslängd än själva brokonstruktionen. Renovering av broars tätskikt leder till att körfält i bron måste stängas av för underhåll.

Vilka ställen i en bro är svåra/omöjliga att inspektera

Lådbroar av mindre modell är svåra att inspektera pga. broarna har en liten inneslutande volym där tillgängligheten kan vara begränsad.

Lagren i en brokonstruktion utgör också ett problemområde för inspektion då de är placerade under bron farbana och i trånga utrymmen. Det som ökar svårigheten vid inspektion av lagren är det faktum att dem är placerade under bron. Oftast krävs ställningar på plats för att nå upp och inspektera lagren. Johan framhäver dock att bron undersida överlag är ett problemområde att inspektera pga. behovet att etablera ställningar på plats.

Vilken skada tror du man kan övervaka med SHM

Sprickor vet Johan att man idag mäter och att det finns rapporter om att dynamiken och resonansen i broar övervakas.

En teknik som Johan tror på, är att använda drönare för okulär inspektion, det är just drönarnas lättmanövrering och förmåga att kunna ta sig till svåråtkomliga platser på bron för inspektion. Drönarna skulle också kunna utrustas med sensorer för att utföra mätningar på plats. Med drönarna så skulle man då kunna upptäcka sprickor, frostsprängningar och rost i armering.

Om SHM ska implementeras, vem enligt dig skulle ansvara för utrustning och data

Det organ som har kapacitet och skulle kunna genomföra implementering av SHM är Trafikverket. Om vi ska börja jobba med SHM så krävs det att intresset för att börja jobba med tekniken kommer från Trafikverket.

Tror du att det finns en ekonomisk vinning i att arbeta med SHM vid förvaltning av betongbroar

Ja, om man kan få systemen att fungera till hundra procent så tror Johan att det kan finnas en ekonomisk vinning med SHM.

Tror du att SHM är framtidens instrument för tillståndsbedömning

Johan är tveksam till SHM-konceptet, han lyfter problemet med att han än inte stött på något system som kan implementeras direkt och leverera fullt ut. Det har forskats i SHM-tekniken sen 1980 och än har man inte kommit fram till fullt implementeringsbara lösningar, pga. all tidigare forskning så undrar Johan om man någonsin ska kunna lösa alla problem kring SHM.

Övrigt

Johans förslag på personer att kontakta angående examensarbetet

- Merit Enckell – Tidigare doktorand KTH inom SHM.
- Alberto Leon – Jobbar med metod för att känna av korrosion i parkeringshus.
- Tang Luping - Professor på Chalmers.
- Louise Andersson – Doktorand för Johan på CBI inom underhåll.

Allmänna iakttagelser

Johan anser att renspolning är det viktigaste underhållningsarbetet.

På betongkonstruktioner som inte saltas är det karbonatiseringen som är största problem.

Johan säger att klorider går in på en bred front på samma sätt som karbonatiseringen. Saltet

Kan få lokala ingångar genom sprickor och få lokala angreppspunkter.

Bilaga A2 Redogörelse av intervju med Raid Karoumi 4/4–19

Raid Karoumi blev tillfrågad att medverka i intervjun på grund sin forskning inom SHM. Raid har varit delaktig i över 100 akademiska papper. Raid har praktisk erfarenhet av att implementera SHM på broar.

Hur används SHM idag på broar i Sverige

SHM används lite i Sverige idag, några enstaka projekt har genomförts med framgång men tekniken har svårt att få fäste. Jämför vi användningen av SHM i Sverige med utomlands så finns det flera länder som kommit längre i utvecklingen. USA är i framkanten när det gäller implementering av SHM, men även länder i Asien såsom Kina, Japan och Singapore satsar på SHM.

Raid tycker att det är viktigt för Sverige att arbeta mer med SHM, och ta lärdom från andra länder så Sverige inte hamnar på efterkälken. Genom att avsätta en del av underhållsbudgeten för broar för utveckling av SHM så tror Raid att Sverige kan uppnå en bra kombination av traditionell tillståndsbedömning och SHM.

Vad är av intresse att mäta

På järnvägsbroar för höghastighetståg är man intresserad av att mäta vibrationer.

Äldre järnvägsbroar i stål är man rädd för utmattning och bevakar därför töjningar.

På betongbroar är korrosion och sprickbildning det man oftast bevakar och det finns fiberoptiska system som kan användas för sprickbildning. Men man vill ibland kontrollera spännkraftsförluster i spännarmering. Vilket dock är svårt.

På kabelbroar är det såklart själva kablarna som är av intresse. De bevakas via kabelvibrationer och akustiska metoder för att känna av tecken på brott.

Hur fungerar implementeringen av SHM på de utrustade broarna idag

- Hur hanteras data

Om man samlar in data kontinuerligt vid långtidsmätningar (särskilt vid dynamiska mätningar) blir datamängderna väldigt stora. Ett bättre sätt är att mäta kontinuerligt under 10 minuter. Registreras avvikande beteende beräknas högsta, lägsta, medel och standardavvikelsen och den ointressanta data raderas. Registreras avvikande beteende sparas hela mätserien för vidare analys. Entreprenörerna ansvarar för lagring av data. Trafikverket har inget intresse av denna information utan vill ha saker och ting svart på vitt om det är något problem.

- Vem ansvarar för komponenterna

Vanligast är det den som installerat systemet som ansvarar för komponenterna.

- Vilka stora leverantörer av sensorer finns det

Det finns många så säkrast att kontakta oss på högskolan (KTH) för hjälp, t.ex. HBM, PCB, och Mistras. Mistras arbetar med akustisk emission, vilket är sensorer som med hjälp av akustik kan identifiera brott i hängkablar. Tekniken kan användas för tillståndsbedömning av förspända armeringsjärn.

Soundprint arbetar också med akustisk emission.

Vilka system har Raid vart med och installerat

Raid har installerat SHM-system på Svinesundsbron mellan Sverige och Norge. och Höga kusten-bron mellan Kramfors och Härnösand.

Syftet att använda SHM på Svinesundsbron var för att följa upp och kontrollera brons beteende och verkningssätt under byggskedet samt de fyra första åren i drift. Man fortsatte att övervaka bron under 10 år.

I Höga-kusten-bron så hade man observerat slitage på huvudlagren. Det väckte misstankar om att krafterna i lagren var större än vad man förutsett. Syftet med instrumenteringen av Höga kusten-bron var att mäta krafterna i lagren kontinuerligt.

Finns det sensorer/system som inte används idag som du tror skulle göra stor nytta

Användningen av drönare är något som Raid tror kommer öka i framtiden. Då drönare kan ta sig till platser som är svåra att undersöka och att man kan utrusta drönare med sensorer så finns det potential i tekniken.

Japan och USA forskar mycket har kommit långt inom drönartekniken och säger att där har Sverige mycket att lära ifrån.

Raid lyfter fram behovet av fortsatt forskning och säger att KTH kommer starta ett mastersarbete 2020 om drönartekniken.

När det kommer till sensorer så kommer framtidens sensorer att vara placerade på fordon som kommer åka över bron och känna av brons hälsa på det sättet. Något som är mer effektivt än att placera ut sensorer på varje bro.

Man kommer också använda sig mer av tvillingmodeller i BIM program där informationen från systemen visar sig i realtid på modellen.

Vad är problemen med att implementera SHM på bred front idag

Ett stort problem för att SHM ska implementeras är att det saknas direktiv från Trafikverkets sida.

Vilka broar är av intresse för övervakning och hur ska de olika entreprenörerna arbeta med SHM för Trafikverket.

Raid lyfter också fram problemet att det saknas kompetens inom SHM och framför allt inom dataanalys.

Om SHM ska implementeras på bred front, hur ska man då gå till väga

- Vem borde vara den drivande parten
Incitamentet för SHM måste komma ifrån Trafikverkets sida. De olika entreprenörerna och konsulter kan inte vara drivande. Entreprenörerna/konsulterna kan i dagsläget göra förfrågningar till Trafikverket att implementera SHM på de broar som dem förvaltar, men för att SHM ska få fotfäste så måste ett intresse finnas hos Trafikverket.
- Vem borde vara ansvarig för data och dess arkivering
Trafikverket ska ansvara för arkiveringen av den insamlade data precis som Trafikverket har arkivering av diverse handlingar av broar idag. Den insamlade data kan inte fastna hos enskilda parter då en osäkerhet finns i om dessa parter kommer finnas kvar längre fram i tiden och vara aktiva inom SHM. Då kommer framtida analyser av data bli omöjlig och en stor mängd data kommer att gå förlorad eftersom ingen vet vart den finns lagrad.
- Vem borde äga utrustningen
Den som väljer att investera i utrustningen ska vara ägare. Raid lyfter fram att det finns lite olika lösningar på just ägandet av utrustning.
 - Under Svinesunds projektet ägdes utrustningen av ett bolag och Trafikverket hyrde utrustningen under projektets tid. Denna typ av lösning kan leda till stora kostnader för Trafikverket.
 - En alternativ lösning är att Trafikverket investerar i egen utrustning och på sikt bygger upp ett lager av utrustning som kan flyttas mellan olika projekt efter behov.

Bilaga A3 Redogörelse av intervju med John Leander 24/4–19

John Leander har blivit tillfrågad att medverka på intervju på grund av sin forskning inom Structural Health Monitoring och arbete med förlängning av livslängder på broar.

John har publicerat över 30 akademiska papper inom byggnadskonstruktion.

Presentation av John Leander

John Leander är lektor i konstruktionsteknik och docent inom brobyggnad vid institutionen för byggvetenskap på Kungliga Tekniska Högskolan i Stockholm. Hans forskning är inriktad på tillförlitlighetbaserade metoder för bedömning av befintliga konstruktioner i allmänhet, fokuserat på utmattning av stålbroar. Johns övergripande mål är att förlänga livslängden för befintliga stålbroar och hans forskning innefattar t.ex. tillståndsbedömning genom övervakning, utmattningsbedömning med användning av brottmekanik, probabilistiska metoder och beslutstöd för underhållsplanering.

Vad har du för erfarenhet av SHM

John var med och utförde ett omfattande övervakningsprogram av Järnvägsbron över Söderström i Stockholm tillsammans med Raid Karoumi och Andreas Andersson. Vid en rutinundersökning så upptäcktes sprickor i flänsarna på de primära stålbalkarna i bron. Syftet med övervakningen var att utforska skillnaderna mellan de teoretiska indikationerna och den inspekterade verkligheten.

De primära stålbalkarna utrustades med 54 trådtöjningsgivare och 5 accelerometrar för att kunna uppskatta brons beteende under verkliga lastförhållanden. Rälerna utrustades också med trådtöjningsgivare för att undersöka samspelet mellan spåren och de sekundära tvärbalkarna.

John var också med och undersökte Gamla Lidingöbron tillstånd. Lidingöbron skulle ha ersatts någon gång vid år 2020, men med hjälp av mätningar och kontinuerlig övervakning så kunde livslängden på Lidingöbron förlängas under tiden för projektering och byggande av den nya bron. Vid projektet användes både trådtöjningsgivare, accelerometrar och lutningsmätare där vissa av sensorerna var sladdlösa och batteridrivna och andra kopplades in med kablar för dataöverföring och strömtillförsel. Mätssystemet ersätter dock inte visuella inspektioner utan fungerar som ett komplement för att kunna göra bedömningar av konstruktionens tillstånd.

John medverkade vid installation av ett mätsystem på Götaälvbron i Göteborg.

Hur används SHM idag på broar i Sverige

Det beror litegrand på vad man menar med SHM och att enbart använda SHM som ett samlingsnamn kan vara missledande. John förklarar för oss att det finns flera olika inriktningar för SHM inom brokonstruktion men att de två huvudgrupperna är,

- Tillståndsbedömning med hjälp av SHM
- Skadedetektering och övervakning av skador med hjälp av SHM

John menar att det är viktigt att göra skillnad på dessa två olika typer av användning av SHM. En direkt tillståndsbedömning med hjälp av SHM finns inte idag, John har aldrig sett eller hört talas om ett system som klarar av att automatiskt utföra en tillståndsbedömning av vare sig en skada eller en brokonstruktion i sin helhet. Men John tror att inom snar framtid så kommer det finnas system som inte bara levererar mätdata utan som också kan utföra en tillståndsbedömning som en integrerad del i ett system för SHM. John har deltagit i det internationella forskningsprojektet ”COST¹ TU1402 Quantifying the value of structural health monitoring”. Projektets mål var att visa på nyttan med mätningar och ge beslutsfattare verktyg för att kunna utvärdera när mätningar är fördelaktiga. John är med och bedriver forskning för att kunna automatisera tillståndsbedömningen av konstruktioner med SHM.

¹ COST är en europeisk organisation som finansierar plattformar för forskningssamarbeten.

Specialiserade metoder för skadedetektering och övervakning av skador med hjälp av SHM existerar dock. Det är vitt utspritt och används frekvent ute i industrin både nationellt och internationellt. Här finns många olika utvecklade system och dataprogram som kan användas. Akustisk emission är ett exempel på skadedetekteringssystem, det har utförts många studier kring systemet med lovande resultat men en stor nackdel som John ser det är att akustisk emission kan bara upptäcka när en skada sker och inte upptäcka processen fram till att skadan uppstår. Detta kan vara ett problem enligt John som menar att när mätningarna ger utslag, då kan det vara för sent att utföra åtgärder. Att detektera skador som är svåra att förutsäga till position och omfattning är ett ämne för fortsatt forskning. Att hitta en liten skada i en stor bro med ett begränsat antal sensorer är en stor utmaning som fortfarande inte är löst.

Vilka brokonstruktioner är i störst behov av SHM

Kritiska broar som är i störst behov av SHM definierar John som broar där man vet att det finns skador eller broar som har en stor samhällskonsekvens kopplat till sig och som resulterar i stora samhällskostnader ifall de skulle sluta fungera och måste tillfälligt stängas av eller tas ur bruk. Som exempel lyfter John fram Essinge broarna, Älvsborgsbron eller Öresundsbron.

Det är inte intressant att instrumentera nya broar då brottsannolikheten är väldigt liten och brons livslängd oftast är 120 år, därför är det inte möjligt att instrumentera broarna med sensorer vars livslängd i bästa fall är 20–25 år. Det är inte helt ovanligt att många sensorer enbart överlever 1 år då den stränga miljön i Sverige skadar eller slår ut sensorerna. Äldre broar med mindre kostsamma skador är inte heller av intresse att utrusta med sensorer, då kostnaderna för ett fungerande sensorsystem sällan understiger 500'000 SEK. Då är det helt enkelt billigare att utföra reoveringarna utan att först övervaka dem. Skulle samhällskostnaden för en reparation stiga väsentligt så kan det vara av intresse att först utrusta bron med ett sensorsystem för att kunna skjuta på reparationsingreppet in i framtiden så länge som möjligt.

Ett väldigt påkostat sensorsystem uppskattar John till 2'000'000 SEK eller mer. Kostnaderna för sensorsystemen ska endast fungera som riktmärken och den riktiga kostnaden för systemet måste bestämmas från fall till fall.

Vilka skador kan man övervaka med SHM

Det finns många olika system för att övervaka olika skador, exempel är övervakning av sprickor i både stål och betongbroar. Vi kan mäta och övervaka utmattningskador med hjälp av specialiserade sprickgivare eller trådtöjningsgivare. Att mäta korrosionen i armeringsjärn eller ståldetaljer är svårare men omfattningen kan uppskattas med okulär inspektion, laserskanning eller ultraljudsprovning, det finns forskning utförd för att mäta korrosion med akustisk emission. Att använda akustisk emission för äldre stålbroar i fält kan dock vara svårt enligt John. Det är för att en stålbro genererar så mycket ljud att det är svårt att urskilja just de ljud som är av intresse för mätningen.

Vi kan mäta förskjutning i konstruktioner och många laboratorieförsök har genomförts med goda resultat. Det är dock en svårighet att mäta förskjutning i verkliga projekt då det är svårt att lokalisera en fast referenspunkt i större broprojekt.

Hur kan SHM förlänga livslängden på broar

Idag görs konservativa antaganden när en bro ska bedömas pga. osäkerheten i storleken på lasterna som belastar bron samt brons verkningssätt. Det gör att den uppskattade kvarvarande livslängden på en bro kan underskattas och bron blir utdömd för tidigt.

SHM kan användas för att ge oss bättre förståelse för vilka laster som belastar den specifika bron samt brokonstruktions verkningssätt, och det leder till en större säkerhet i bedömningen av brons kvarvarande livslängd och oftast till att livslängden kan förlängas.

Vilka SHM system anser du vara mest användbara

Det beror på vad man är intresserad av att mäta, olika sensorer används för olika ändamål. Konventionell teknik baserad på trådtöjningsgivare och accelerometrar är beprövad och ger tillförlitliga resultat. I kombination med trådlösa sensornätverk eller fiberoptiska system tror John att mätningar i huvudsak kommer att baseras på dessa tekniker. För att främja ett mer utbrett användande av SHM är det monteringen av sensorer, strömförsörjning och datainsamling som behöver utvecklas. Inte nödvändigtvis själva sensorerna.

Vad är livslängden på de olika sensorerna

Olika sensorer har olika livslängder och det framgår på återförsäljarnas hemsidor vilka livslängder som deras sensorer har. Men man ska dock vara kritisk till de redovisade livslängderna, många återförsäljare lovar livslängder på 20–25 år men det är inte ovanligt att vid instrumentering så slutar många sensorer att fungera efter första året i bruk. Det kan bero på många orsaker till varför sensorerna slutar fungera, de kan skadas vid montering, det svenska vinterklimatet är hårt ansträngande på sensorerna och dess tillhörande instrument.

De enskilda sensorerna är dock relativt billiga och ett sätt att övervinna dessa problem kan vara att helt enkelt räkna med att sensorer kommer att gå sönder och behövas byta ut. Det är något att tänka på när man instrumenterar en bro med sensorer att sensorsystemet i sig självt kommer behöva underhåll och reparationer i framtiden.

Vad hindrar oss från att implementera SHM på bred front idag

Ett stort problem för att SHM ska implementeras i det vardagliga inspektionsarbetet av broar är att det saknas direktiv i normerna om hur man ska behandla den uppmätta data och vad man ska använda data till. Det bedrivs forskning bl.a. hos oss på Bro- och stålbyggnad kring hur data ska lagras, analyseras och korreleras till broskador. Innan det finns riktlinjer i normerna för konsulter att arbeta utifrån så kommer vi nog inte att se en större implementering av SHM.

Då man än inte kan använda SHM för automatiserad tillståndsbedömning av brokonstruktioner så finns inget incitament ifrån konsulterna att börja använda SHM. Konsulterna har idag väl etablerade tillvägagångssätt för att utföra sina tillståndsbedömningar och ser ingen nytta av att använda SHM som redskap då det ej är fullt utvecklat.

Tror du att det finns en ekonomisk vinning i att arbeta med SHM vid förvaltning av betongbroar

En stor ekonomisk vinning kan vi uppnå genom att förlänga vårt brobestånds livslängd. Det går att göra genom att samla faktiska data om brokonstruktionernas lasteffekter och hälsa så vi kan få en bättre förståelse för hur broarna faktiskt mår och det leder i många fall till att vi kan förlänga broarnas livslängder. Gör vi istället konservativa antaganden om lasteffekter utan att faktiskt vara på plats och mäta fordonsmängden och dess belastning, då riskerar många broar att bli utdömda. Det är inte miljövänligt eller kostnadseffektivt att riva och bygga om vårt brobestånd. Vi måste rädda våra broar nu och SHM är ett bra verktyg att ha till hands.

Om SHM ska implementeras på bred front idag, hur ska man då gå till väga

- Vem borde vara den drivande parten

Broförvaltarna med Trafikverket i spetsen måste vara den drivande parten. Intresset för att använda SHM vid övervakning och tillståndsbedömning kan inte komma ifrån entreprenörerna eller konsulterna då det är svårt för dem att finna ekonomisk vinning genom att använda tekniken om inte ett ekonomiskt incitament finns ifrån förvaltarnas sida.

- Vem borde vara ansvarig för data och dess arkivering

Broägaren måste äga sin egna data och tillståndsbedömning. För Trafikverkets räkning så skulle det vara bra om man kan skapa ett liknande system som BaTMan eller integrera SHM data i BaTMan.

- Vem borde äga utrustningen

Den som väljer att investera i utrustningen ska vara ägare.

Vid längre underhållsperioder så skulle entreprenörerna få större incitament att investera i sin egen utrustning om intresse att utrusta broar med SHM finns från förvaltarna. En annan lösning skulle vara att Trafikverket investerar i egen utrustning och instrumenterar de broar som är av intresse, entreprenörerna skulle sedan få tillgång till Trafikverkets utrustning för att utföra tillståndsbedömning

Bilaga A4 Redogörelse av intervju med Viktor Ansnaes 26/4–19

Viktor har blivit tillfrågad att medverka på intervju på grund av sin långa erfarenhet av broinspektioner. Viktor har arbetat som broinspektör sen examen vid KTH 2012 och arbetar idag för konsultföretaget ÅF.

Presentation av Viktor

Viktor studerade civilingenjörsprogrammet vid KTH åren 2007–2012 och sommarjobbade för Trafikverket som brokontrollant, tjänsten innebar att resa runt i region Stockholm och kontrollera ifall det planerade och avtalade underhållet av brokonstruktioner var utfört. Sommarjobbet hos Trafikverket väckte intresset hos Viktor att arbeta med broinspektion. Efter avlagd examen på KTH fick Viktor jobb hos Reines Sverige AB på deras broinspektionsavdelning. Avdelningen köptes i sin tur upp av ÅF och Viktor valde att fortsätta arbeta som broinspektör för ÅF.

Vad är tillståndsbedömning av broar

Med jämna mellanrum måste Sveriges brobestånd inspekteras för att få en uppdaterad bild av brons tillstånd. Det är en viktig aspekt under brons livslängd för att säkerställa brons säkerhet samt kontrollera ifall några reparationsåtgärder behövs för att bron ska kunna uppnå sin projekterade livslängd.

Beroende på om bron är ny eller har vart i drift en längre tid så finns olika mängder data tillgänglig om bron. Vid äldre broar så existerar data om tidigare utförda tillståndsbedömningar i Trafikverkets förvaltningssystem för bro och tunnlar BaTMan. Det som kontrolleras vid en tillståndsbedömning är, tidigare utförda tillståndsbedömningar och om bron har några skador registrerade.

Efter genomgång av den tillgängliga informationen görs ett platsbesök till bron (inspektion).

Syftet med tillståndsbedömningen är då att kontrollera om de existerande skadorna har förändrats, blivit värre, bättre eller inte förändrats alls. En ny tillståndsbedömning utförs av de existerande skadorna, dvs en uppdaterad. Det undersöks också ifall några nya skador har uppstått och dessa tillståndsbedöms genom att de tilldelas en tillståndsklass. Det är viktigt att fotodokumentera alla skador som man inspekterar då foton används som underlag för att följa skadeutvecklingen. Foton kopplas till skadan i BaTMan och blir en del av skaderapporteringen. Bron i sin helhet ska också fotograferas i fyra väderstreck (vy bilder) och dessa bilder laddas också upp i BaTMan.

Vad är skillnaden mellan inspektion och tillståndsbedömning

En inspektör utför inspektioner, man kan säga att det är inspektörens verktyg för att kunna utföra en tillståndsbedömning. Genom att undersöka en konstruktion på nära håll så kan skador på konstruktionen upptäckas. Skadorna kan upptäckas genom okulär inspektion, en okulär inspektion är när inspektören synar konstruktionen inom en armlängds avstånd, vilket oftast förenklas till ett avstånd av 1 m. Men alla skador eller brodelar kan inte undersökas med enbart okulär inspektion. Inspektören kan då använda sig av oförstörande- eller förstörande provning som alternativa metoder för inspektion. Oförstörande provning är en metod där man använder redskap som kan känna av tillståndet på de parametrar av intresse utan att förstöra objektet som mäts till skillnad från destruktiva testning där provobjektet förstörs vid undersökning. Exempel på oförstörande provning är georadar, ultraljudsundersökningar, resistent mätningar och studshammare. Exempel på förstörande provning är, borrhävar, håltagning eller nedmontering.

Efter att en broinspektion är utförd så använder inspektören den insamlade informationen för att utföra en tillståndsbedömning, vilket är en uppskattning av konstruktionens tillstånd i helhet.

Hur är regionsuppdelningen för Trafikverkets brofövaltning

- Region Mitt
- Region Nord
- Region Stockholm
- Region Syd
- Region Väst
- Region Öst

Hur är de olika regionerna för broförvaltning i Sverige uppdelat

Region Mitt:

- Borlänge (Huvudkontor)
- Gävle (Regionkontor)
- Härnösand
- Östersund

Region Nord:

- Luleå (Regionkontor)
- Umeå

Region Stockholm:

- Stockholm (Regionkontor)
- Visby

Region Syd:

- Kristianstad (Regionkontor)
- Jönköping
- Växjö
- Kalmar
- Karlskrona
- Malmö

Region Väst:

- Göteborg (Regionkontor)
- Karlstad
- Skövde
- Vänersborg
- Halmstad

Region Öst:

- Eskilstuna (Regionkontor)
- Uppsala
- Västerås
- Örebro
- Linköping

Vilka olika broinspektionstyper finns det

Huvudinspektion

Huvudinspektionen genomförs minst var sjätte år och är den grundligaste inspektionstypen. Med huvudinspektionen vill man upptäcka och bedöma skador som inom en 10 års period kan påverka brons funktion eller trafiksäkerhet. Man vill också identifiera skador så tidigt som möjligt för att därmed kunna hålla nere förvaltningsskadorna. Alla konstruktionselement som är åtkomliga och angränsande områden, så som slänter ska inspekteras okulärt på en armlängds avstånd, vilket är ca 1 meter.

Särskild inspektion

Särskild inspektion utförs efter att inspektören har beslutat att det finns ett behov av att undersöka en misstänkt skada närmare. Ett exempel på särskild inspektion är inspektion av tätskiktets funktion. Vid inspektion av tätskiktet är det idag vanligt med förstörande provning. Man sågar helt enkelt ett hål i farbanan ner till tätskiktet för att bedöma dess kvarvarande livslängd. Men det är också vanligt att icke förstörande provning används vid särskild inspektion.

Allmän inspektion

Allmän inspektion utförs mellan två huvudinspektioner och är en uppföljning av de skador som identifierats under huvudinspektionen men som inte åtgärdats än. För att se till att inga nya skador har uppstått utförs också en mindre noggrann genomgång av konstruktionen i helhet. Om nya skador som kan påverka konstruktionens funktion eller trafiksäkerhet identifieras vid en allmän inspektion så dokumenteras dessa och registreras i BaTMan. Mindre skador som t.ex. sprickor vilka inte påverkar konstruktionens funktion dokumenteras inte.

Vilka tillståndsklasser finns det och vad betyder dem

Trafikverket använder sig av 4 tillståndsklasser dessa är:

- TK0 = Bristfällig funktion bortom 10 år
- TK1 = Bristfällig funktion inom 10 år
- TK2 = Bristfällig funktion inom 3 år
- TK3 = Bristfällig funktion vid inspektionstillfället

TK0: Är den lägsta tillståndsklassen. Denna används om en skada är så lindrig att det anses att den inte kommer påverka konstruktionsdelens funktion de närmaste 10 åren.

TK1: Om en skada anses vara betydande nog att påverka konstruktionsdelens funktion inom 10 år, men inte i nuläget så sätter man TK1

TK2: Vid TK2 bör skador åtgärdas innan skadan får en TK3 klassificering.

TK3: Är den högsta tillståndsklassen. Konstruktionsdelen anses vara bristfällig inom 3 år. Skadan ska följas upp minst vart 3:e år om den tillhör en bärande eller skyddande konstruktionsdel. En skadeutredning ska påbörjas inom 3 månader om skadan tillhör en bärande eller skyddande konstruktionsdel.

Vilka skador på betongbroar/samverkansbroar stöter du på mest under broinspektioner

De allra vanligaste skador jag stöter på i betongbroar är sprickor. Sprickor uppstår på många delar av en bro men de flesta sprickorna är inte farliga utan en naturlig del i betongens åldrande. Många plattramar får dragsprickor mitt i plattan men de är sällan akuta. Spjälkning är också ofta förekommande och är en konsekvens av armeringskorrosion. Armeringskorrosion är i sig en skada men framförallt en skademekanism för andra skador. Det finns standardiserade förfarande om hur man ska uppskatta armeringskorrosion i en betongkonstruktion. Det hade dock vart bra om man skulle kunna utveckla ett SHM system som automatiskt kan utvärdera armeringskorrosion.

En enkel metod för att minimera saltskador på betongkonstruktioner är att klä in konstruktionen med skydd så som plåtar. Ett problem med det dock är att betongen inte går att okulärt inspektera längre. Andra vanligt förekommande skador på en betongbro är, plogskador, korrosion på räcken samt skador som uppstår pga. bristfälligt underhåll så som grusansamling vid lager. Detta skulle lätt kunna motverkas med väl utfört underhåll.

Vilka brodelar är mest utsatta

Bropelare i vägmiljö och framförallt är det tösalt som skapar problem. Underhållsarbete där man spolar betongkonstruktionen med vatten är effektivt mot saltinträning.

Vilka är de allvarliga skadorna ur en betongbros säkerhetsperspektiv

Skjuvsprickor är allvarliga skador som blir tilldelade TK3 om dem existerar. Skjuvsprickor kan uppstå genom tvärkraftbelastning och syns i form av diagonalsprickor i platta eller balk i närheten av stöd. Skjuvsprickor är ett tecken på att bron kan vara feldimensionerad (ej tillräcklig tvärkraftarmering) eller blivit överbelastad. Detta är allvarligt och kan leda till följskador, till exempel brott, om inget görs. Det kan vara intressant att göra mätningar med SHM-system för broar som belastas med de ökade tonnaget. För att upptäcka eventuella skjuvsprickor.

Vilka betongbroskador är kostsammast att underhålla bortsatt från samhällskostnader

Om man bortser ifrån samhällskostnader, då är nog de dyraste skadorna att reparera de som är belägna under vatten. Det är för att det krävs mycket extra utrustning, i form av pråmar, dykutrustning och undervattensverktyg. Då en renovering under vatten kräver undervattensspecialister bidrar det också till ökade kostnader. Men vid alla reparationer på broar så tar man alltid hänsyn till samhällskostnader och försöker minimera de så mycket som möjligt.

Vilka betongbroskador är viktigast efter upptäckt att hålla under fortsatt uppsikt

De absolut viktigaste skadorna att hålla under uppsikt efter upptäckt är belastningsskador så som skjuvsprickor. Det är för att dem påverkar brons verkningsätt. Ett väldigt intressant område att få till ett fungerande SHM system är för att övervaka just sprickor vid upplag, för att tidigt kunna identifiera skjuvsprickor och att sen övervaka skjuvsprickornas utveckling

Spjälkning är också viktigt att övervaka. Det är för att spjälkning kan leda till belastningsskador då armeringsfunktionen försämras som i sin tur kan leda till att broarnas tonnage behöver minskas.

Har du någon erfarenhet av att använda SHM

Ja, jag har använt och experimenterat lite med manuella sprickmätare och tätskiktsmätare. Men i mitt dagliga arbete använder jag mig sällan av mätinstrument. Mest jobbar vi med okulär inspektion.

Tror du dock att du skulle ha nytta av SHM-tekniken i ditt vardagliga jobb?

Absolut, jag tror tekniken har en framtid inom broinspektion, men kanske måste inte fullt automatiserade sensorsystem vara det första som vi försöker implementera. Många gånger i mitt vardagliga arbete så skulle en enkel kamera som sitter fastmonterad på en bro vara ett bra hjälpmedel. Det finns många broar där vi måste stänga av trafiken för att kunna utföra en inspektion, exempel på detta är broar över trafikerade vägar. Men där en monterad kamera skulle göra som störst nytta är på broar över järnvägsspår. Det är för att, om vi ska kunna inspektera bron som går över järnvägsspåret så måste strömledarna stängas av och det leder till att inget tåg kan passera medan vi utför vår inspektion. Hade man då haft en eller flera kameror monterade på bron. Då skulle man kunna utföra en inspektion med hjälp av kamerorna. Ser man indikationer på att skador finns på bron, då kan man stänga av strömledarna och utföra en mer grundlig inspektion. Ser man inga indikationer på skador då behövs ingen vidare inspektion.

Kameror skulle också vara väldigt hjälpsamma inne i lådbroar, oftast finns ingången till lådbron placerad över farbanan och vi är tvungna att stänga av vägen för att kunna ta oss in. Det leder till högre samhällskostnader och irritation hos bilförarna som fastnar i köer. Hade man då utrustat lådbron med kameror så skulle man kunna utföra inspektionen på samma sätt som vid broar över järnvägsspår.

Tror du Trafikverket skulle godkänna en inspektion utförd med kamera på det sättet som du beskriver?

Ja, vi använder oss av kameror idag vid undervattensinspektioner. Där vi först skickar ner en dykare för att undersöka skadorna närmare efter att kamerorna har identifierat att en skada finns.

Vilka broskador tror du skulle gynnas av att övervakas med SHM

Det måste nog vara belastningsskadorna, det är för att den typen av skador är så farliga. Men det är väldigt sällan som dem uppstår. Men har man identifierat en belastningsskada så skulle det vara väldigt bra om man skulle kunna övervaka den automatiskt med ett sensorsystem.

Vid undersökning av rörebroar så måste man utföra ultraljudstester, kanske skulle man kunna bygga in ultraljudsutrustningen i bron. Men jag vet inte om det skulle finnas någon ekonomisk vinning i att utrusta alla broar med ultraljudsutrustning då den existerande utrustningen idag är väldigt smidig att bara ta med sig ut på plats.

Nya broar tror jag också skulle vara av intresse att utrusta med sensorsystem, man skulle ju då få väldigt bra historisk data på hur bron betar sig. Vi som konsulter eller Trafikverket är idag inte så intresserade av den data men forskarna skulle nog ha nytta av den för att kunna revidera våra normer och för att kunna optimera brokonstruktionerna.

Vi som konsulter är inte intresserade av data då vårt arbete är att identifiera skador och inte skadeorsaken. Vi är inte intresserade av skadeorsaken för att Trafikverket inte är intresserade av skadeorsaken bara av informationen om en skada finns på bron eller inte.

TRITA TRITA-ABE-MBT-19290