



CH-6916 GRANCIA
Via al Molino 6
Switzerland
Tel. +41 91 993 09 24
Fax.+41 91 993 09 40

VERFORMUNGSMESSUNGEN MIT OPTISCHEN GLASFASERSENSOREN

Casanova Nicoletta - ETHZ Saal E1 - 3. Oktober 1997, 11:20



VERFORMUNGSMESSUNGEN MIT OPTISCHEN GLASFASERSENSOREN

Nicoletta Casanova

EINFÜHRUNG

Im Bauwesen erfordert die Sicherheit eine periodische Überwachung der Bauwerke und in dieser Hinsicht hat sich das Konzept der intelligenten Struktur (**Smart Structure**) in vielen Bereichen des Ingenieurwesens als wirksam erwiesen. Diese Strukturart ist mit einem internen Netz von Glasfasersensoren ausgestattet, das die Überwachung unterschiedlicher kritischen Parameter (wie Deformation, Temperatur, Druck, usw.) für die Sicherheit oder für eine wirksame Planung der Unterhaltsarbeiten ermöglicht.

Das Bedürfnis nach Verfahren, das eine automatische und permanente Überwachung im Inneren der Struktur mit höchster Präzision und mit einer befriedigenden räumlichen Auflösung ermöglicht, hat zur Entwicklung des Messsystems SOFO ("Surveillance d'Ouvrages par Fibres Optiques") geführt.

Das Messsystem wurde an der EPFL entwickelt und zusammen mit industriellen Partnern im Feld getestet.

BESCHREIBUNG DER METHODE SOFO

Die Methode SOFO beruht auf dem Prinzip der **Interferometrie in niedriger Kohärenz** (Abb. 1). Die infrarote Emission einer **LED** (Lichtemittierende Diode) wird in eine singlemode Faser vom Standard-Typ Telecom gesendet und durch einen **Koppler** in zwei Fasern übertragen, die in der zu überwachenden Struktur installiert sind. Die erste Faser - **Messfaser** genannt - ist an der Struktur mechanisch befestigt und verfolgt deren Deformationen. Die zweite Faser - **Referenzfaser** genannt - ist im selben Rohr, parallel zur Messfaser, frei installiert. Ein am Ende jeder Faser montierter Spiegel reflektiert das Licht in den Koppler zurück, der die beiden Strahlen zusammenführt und sie zum **Analysator** weiterleitet. Der Analysator besteht aus zwei Fasern, deren Längenunterschied von einem beweglichen Spiegel präzise gemessen wird. Beim Verschieben des Spiegels erzielt man nur dann eine Modulation des von der **Photodiode** detektierten Signals, wenn der Längenunterschied zwischen den Fasern im Analysator den Unterschied zwischen den in der Struktur installierten Fasern kompensiert, und zwar mit einem Fehler, der geringer ist als die Kohärenzlänge der Quelle.

Bei jeder Messung wird eine neue Kompensationsposition erhalten, die der **Deformation der Struktur** im Vergleich zu früheren Messungen entspricht. Das Gerät kann zwischen zwei Messungen von der Struktur getrennt und zur Überwachung anderer Strukturen benutzt werden. Dem Herstellungsprinzip gemäß ist das Gerät für die **Messung geringer Deformationen** geeignet, die sich auch **über mehrere Jahre** erstrecken können.

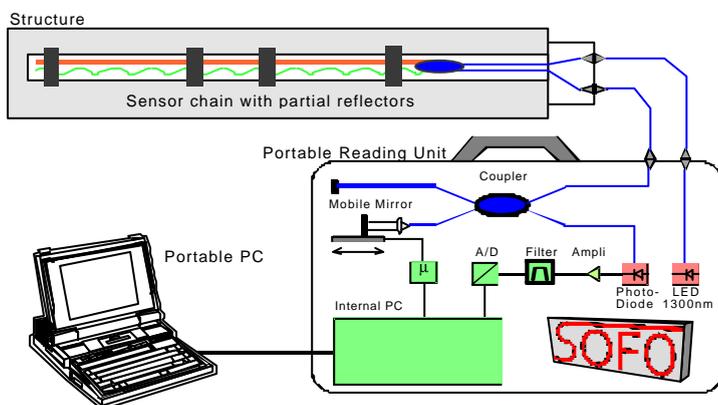


Abbildung 1: Betriebsprinzip des Interferometers in niedriger Kohärenz

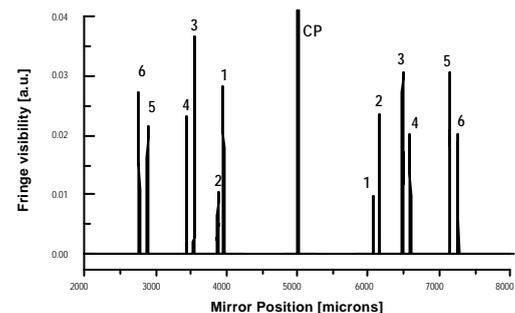


Abbildung 2: Darstellung einer Messung

Die wichtigsten technischen Hauptmerkmale vom Messsystem SOFO werden in der folgenden Tabelle zusammengefasst:

Sensorenlänge :	20 cm bis 8 m für jeden Messteil, bis 8 Teile pro Kette Spezielle Sensoren bis 50 m für spezielle Anwendungen
Auflösung :	2 μm (2/1000 mm), unabhängig von der Messlänge
Messlänge :	Von 20 cm bis über 100 m (6 m für Standard-Sensoren)
Messbereich:	0.5% Verlängerung und 1.5% Verkürzung (Sensor) Bis max. 150 mm Verlängerung und Verkürzung (Messeinheit)
Präzision :	Besser als 0.2 % der Messdeformation
Messgeschwindigkeit :	Weniger als 10 Sek. für jede Sensorenkette
Abweichung :	Nach zwei Jahren Benutzung nicht feststellbar
Unabhängigkeit von :	Temperatur, Feuchtigkeit, Vibrationen, Korrosion und elektromagnetischen Feldern
Messeinheit :	Tragbar, batteriebetrieben, stoßfest, wasserdicht
Sensoren :	Einfach und schnell zu installieren, einbetonierbar oder auf die Oberfläche installierbar, keine Eichung notwendig
Automatische und Fernmessung :	Möglich, ohne Verzerrung der Messungen

Die Abbildungen 3 und 4 zeigen die SOFO-Messeinheit bzw. einen an der Armierung einer Brücke befestigten SOFO-Sensor.



Abbildung 3: SOFO-Messeinheit mit externen PC



Abbildung 4: Vor der Einbetonierung an der Armierung befestigter SOFO-Sensor

ANWENDUNGSBEISPIELE

- Neue und bestehende Brücken: Überwachung der Verformungen während der Herstellung und Benutzung, Bestimmung der Krümmung / der Neutralachse, Kriech- und Ermüdungsüberwachung, Beurteilung der Beschädigungen (Verformungen, Risse,..) nach Erdbeben,...
- Beton und Mörtel: Überwachung der Verformung während der Erstarrung, Interaktion zwischen Beton und Stahl bzw. zwischen altem und neuem Beton, Überwachung von Vor- und Nachspannung, Messung und Überwachung von Rissen,...
- Tunnels: Mehrfach- Extensometer, Überwachung von Fugen, Beurteilung der Spritzbetoneigenschaften, Konvergenzmessungen,...
- Geotechnik: Felsen, Böden, Verankerungen, Pfähle (Überwachung bei Belastungsversuchen,..), Fundamente,...
- Staudämme: Überwachung der Fundamente, der Betoneigenschaften und der Verformungen,...
- Denkmäler : Überwachung von historischen Denkmälern und Werken,...
- Besondere Strukturen: Off shore-Strukturen, Pipelines, Schalen, Wolkenkratzer, Kraftwerke, Schienen, Flugzeug- und Weltraumstrukturen, Aeronautik,...

BISHERIGE ANWENDUNGEN DES SOFO-MESSSYSTEMS

Das SOFO-Messsystem wurde bis heute mit Erfolg angewendet. Hier folgend werden einige Beispiele angegeben:

- Autobahnbrücken und Viadukte: Venoge (VD), Lully (FR), Lutrive (VD), Versoix (GE), OA402 (GE)
- Straßenbrücke: Bissone (TI)
- Bahnbrücke: Moesa (TI)
- Tunnels: Vignes (FR), Luzzzone (TI), N5 bei Solothurn (SO)
- Atomkraftwerk: Electricité de France (F)
- Damm/Staumauer: Emosson (VS), Luzzzone (TI)
- Betonplatte: 20m x 5m x 0.50 m holographischer Tisch bei IMM SA (TI)
- Laborversuche: ICOM/EPFL Balken, MCS/EPFL Platten, IMM SA Balken aus BPR



Abbildung 5: Autobahnbrücke Lully (FR)



Abbildung 7: Staumauer Luzzzone (TI)

Abbildung 6: Autobahnbrücke Versoix (GE)



Abbildung 8: Unterhaltungskammer Luzzzone (TI)

BEISPIEL 1: VERSOIX-BRÜCKE (GE)

Die Versoix-Autobahnbrücke (GE) besteht aus zwei Zwillingenbrücken mit je einer Betonplatte auf zwei vorgespannten Trägern aufgelegt (siehe Abb. 6). Im Jahr 1996 sollte diese Brücke wegen der Verkehrserhöhung erweitert werden.

Das Erweiterungskonzept wird hier folgend gezeigt:

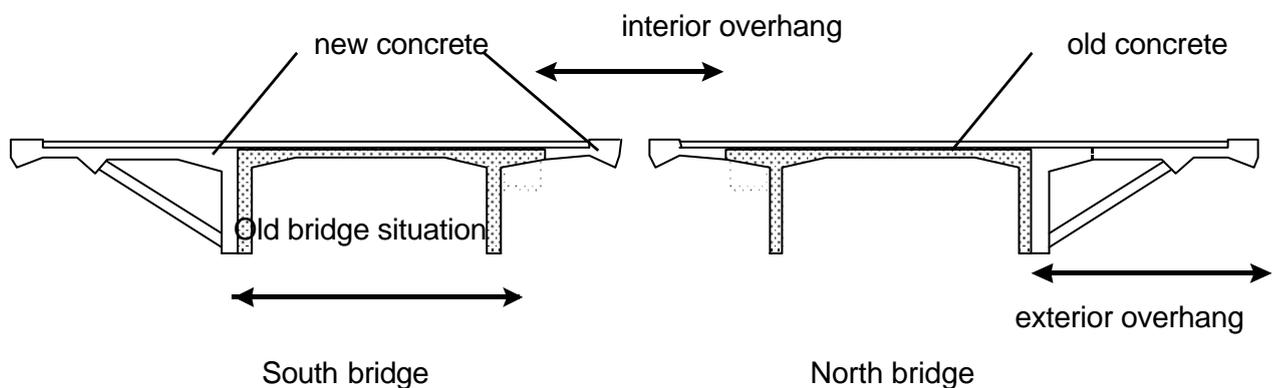


Abbildung 9: Erweiterungskonzept für die Versoix-Brücke (GE)

Wegen dem ungewöhnlichen Bauverfahren entschloss sich der Projektleiter für ein Überwachungssystem mittels Glasfasersensoren für die kurz- und langfristige Kontrolle von 2 Spannweiten einer der Zwillingenbrücken.

Die wichtigen Parameter, die gemessen werden sollten, sind die differenzierten Verformungen vom altem und neuem Beton (Schwinden) und die Krümmung und Torsion der Brücke wegen Lastveränderungen.

Mit dem Programm der Finiten Elemente wurde gezeigt, dass für jede Spannweite einer zweifeldtrigen Brücke mindestens 4 Messungen der Krümmung notwendig sind, um eine gute räumliche Auflösung zu erhalten (2 Gleichungen mit 5-Polynomgrad). Um eine gute räumliche Auflösung zu erhalten wurden deshalb in die Brücke etwa 100 Glasfasersensoren (etwa 8 pro Zelle, siehe Abb. 10) eingeführt. 12 Schnitte (sogenannte Zellen) der Brücke wurden ausgerüstet.

Hier folgend wird eine solche Zelle dargestellt.

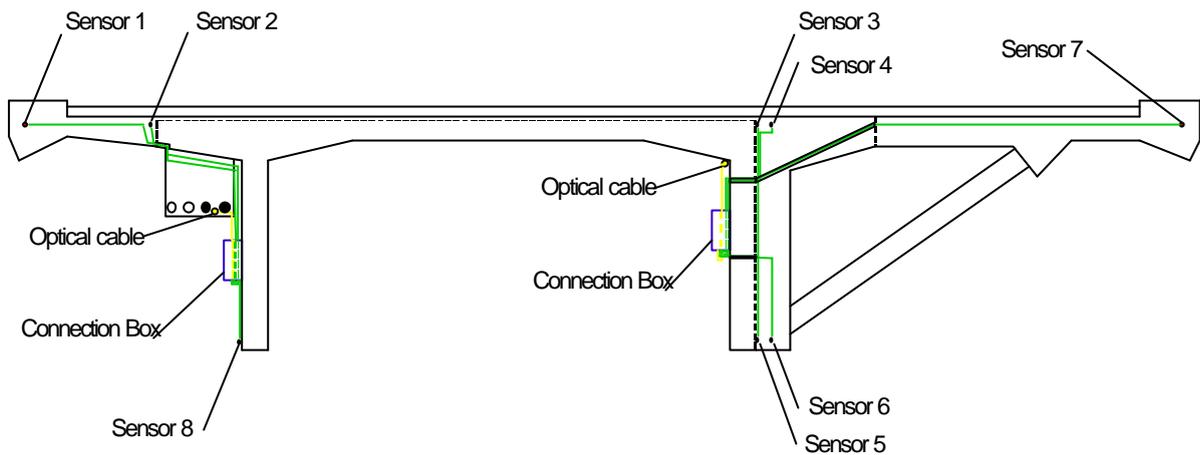


Abbildung 10: Schnitt der Brücke, SOFO-Sensoren bei der Versoix-Brücke (GE)

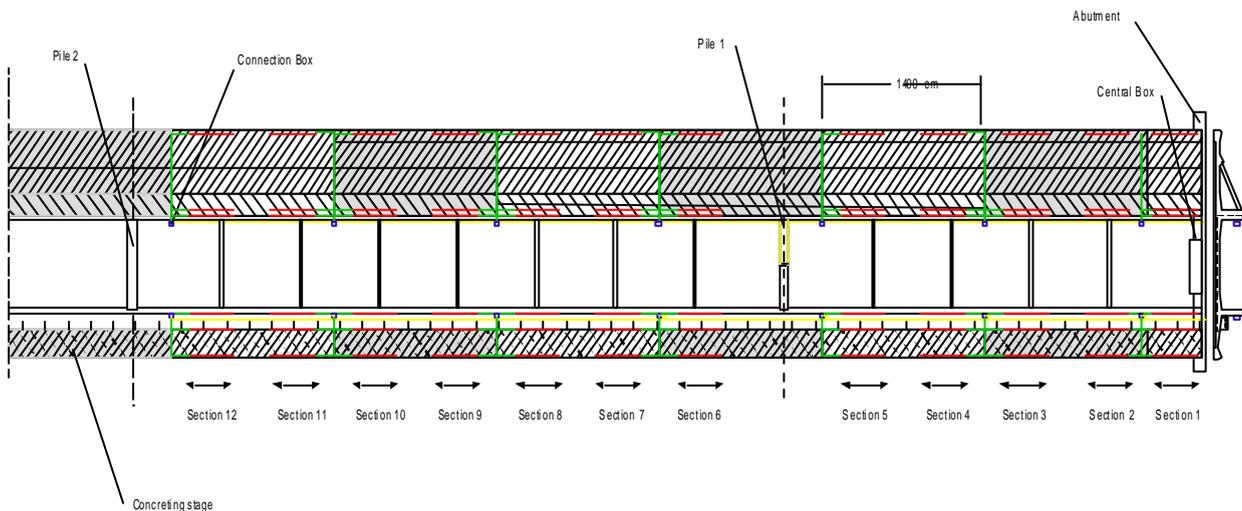


Abbildung 11: Situation der Brücke, SOFO-Sensoren bei der Versoix-Brücke (GE)

Die Installation der Sensoren verursachte keine Verspätung und erfolgte Plangemäss.

Die Sensoren wurden zum Teil an der Armierung vom neuen Betonteil befestigt, zum Teil in Schlitzen im altem Beton injiziert.



Abbildung 12: Installation eines SOFO-Sensors bei der Versoix-Brücke (GE)



Abbildung 13: Betonierung bei der Versoix-Brücke (GE)

Hier folgend werden die ersten Resultate der Messungen gezeigt, die das Schwindverhalten darstellen.

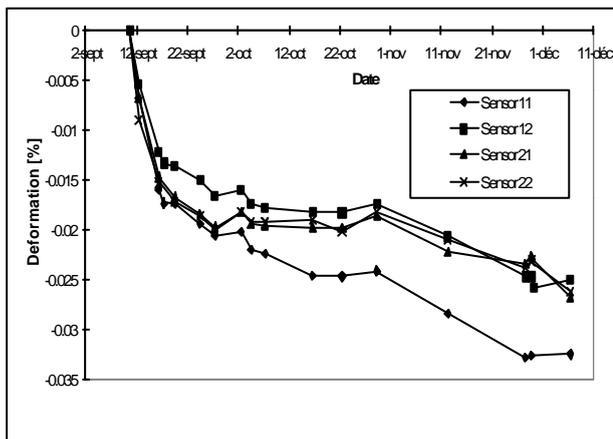


Abbildung 14: Sensorenmessungen der ersten Betonierungsetappe

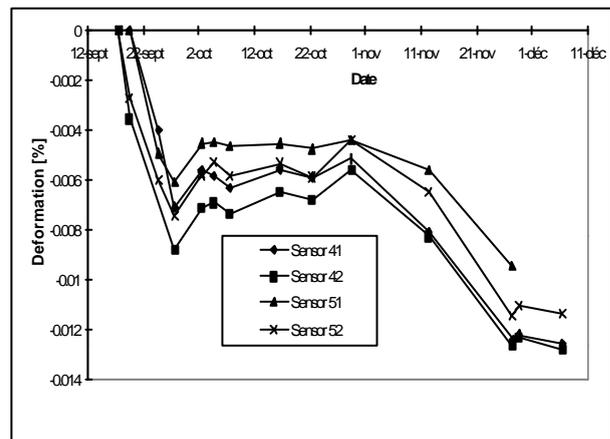


Abbildung 15: Sensorenmessungen der zweiten Betonierungsetappe

Die verschiedenen Verhalten der 2 Diagrammen (Schwinden von 0.02 % bzw. 0.005%) entsprechen den verschiedenen klimatischen Bedingungen bei der Betonierung und den verschiedenen Mischungen, die angewendet wurden. Es ist auch ersichtlich, dass in der 2. Etappe (Abb. 15) Risse entstanden sind: die Schwindmessungen sind plötzlich kleiner geworden, was einer "Entspannung" des Betons entspricht.

Die Risse konnten frühzeitig festgestellt werden, aber wurden erst nach einige Tage ersichtlich.

Für die ersten Tage wurde das automatische und kontinuierliche Messsystem angewendet.

BEISPIEL 2: SBB - MOESA-BRÜCKE (TI)

Auf der Strecke Arbedo-Castione-Bellinzona überquert die Gotthardlinie der SBB die Moesa auf zwei in den Jahren 1896 und 1939 erbauten Einspurbrücken. Die ältere Stahlfachwerkbrücke musste infolge der für heutige Verhältnisse ungenügenden Tragfähigkeit ersetzt werden.

Die neue 89.3 m lange dreifeldtrige Brücke in Verbundweise wurde auf provisorischen Abstützungen gebaut und nach dem Abbruch der bestehenden Fachwerkbrücke quer eingeschoben.

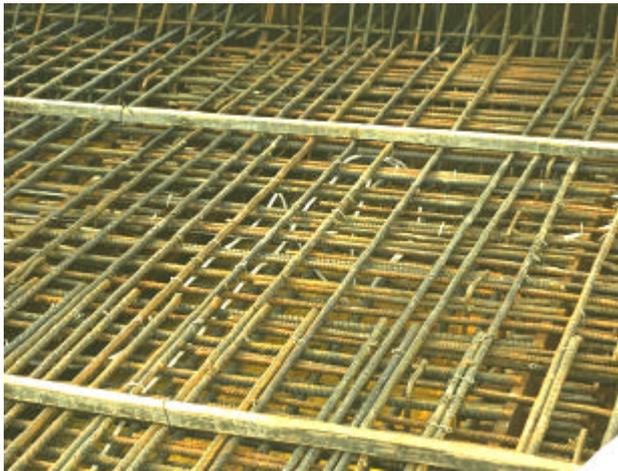


Abbildung 16: Sensoren an der Armierung befestigt



Abbildung 17: Moesa-Brücke, bei der Betonierung

Das SOFO – Messsystem wurde mit 30 Sensoren in die Brücke eingebaut. Damit konnten das Schwinden des Betons sowie die Verformungen der Fahrbahnetappen unter Einfluss der Folgeetappen gemessen werden.

Zudem wurde die horizontale Biegung beim Querverschub bei einem Pfeiler infolge des ungleichmässigen Schubwegs gemessen.

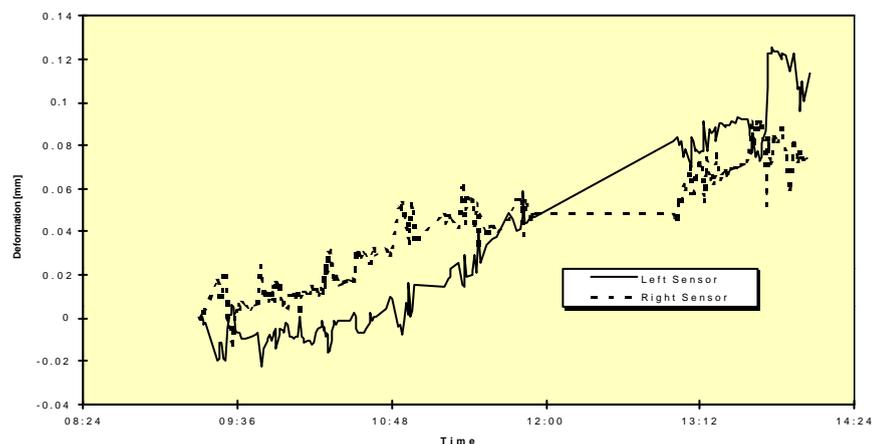


Abbildung 18: Verlängerung bzw. Verkürzung [mm] der SOFO-Sensoren beim Querverschub. Auf der Abszisse die Uhrzeit.

Das vorherige Bild zeigt die Resultate der Messungen während des Querverschubs mittels zwei 2 m langen Sensoren, die links und rechts in einem Abstand von 5.30 m an der Unterseite der Fahrbahnplatte installiert waren.

Es ist zu erkennen, wie bei jedem Pressenhub von etwa 80 cm die Verlängerung des einen Sensors der Verkürzung des anderen entspricht. Ausserdem zeigen beide Kurven eine kontinuierliche Zunahme der Verlängerung und der Krümmung, die auf die Erwärmung der Lufttemperatur um 5 °C während des Verschubs zurückzuführen ist.

Während der Mittagspause verlängerte sich die Brücke infolge ungleichmässiger Erwärmung durch Sonneneinstrahlung auf der linken Seite deutlich stärker als die rechte Seite. Die daraus resultierende Zunahme der Krümmung ist im nächsten Bild zu entnehmen.

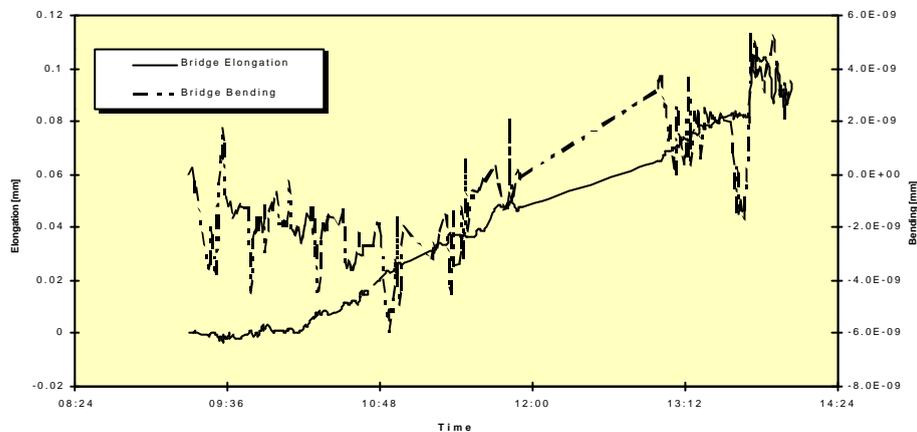


Abbildung 19: Verlängerung [mm] der Brücke auf einer Länge von 2 m (linke Ordinate) und Krümmung [1/mm] beim Nordpfeiler (rechte Ordinate). Auf der Abszisse die Uhrzeit.

Die maximale Brückenkrümmung betrug etwa $5 \cdot 10^{-9} \text{ mm}^{-1}$, was einem Biegemoment von 6'850 kNm entspricht und eine maximale Spannung in den Längsträgern von lediglich 5 N/mm^2 bewirkte.

BEISPIEL 3: TUNNEL LUZZONE (TI)

Im Rahmen des Projektes für die Erhöhung der Staumauer Luzzzone (TI) wurden 8 SOFO-Sensoren in einem Tunnelschnitt einer Unterkammer eingebaut, so wie es in den Abbildungen 20 und 21 gezeigt wird.

Die Bauunternehmung konnte die Bohrungen für die SOFO-Sensoren in derselben Art wie für die Verankerungen vorbereiten (min. \varnothing 50 mm).

Die Sensoren wurden längs an Röhren befestigt und in die Bohrungen hineingeschoben. Danach wurden sie injiziert. Die ersten Messungen konnten schon nach wenigen Stunden erfolgen.

Die Sensoren sollten v.a. die Verformungen der Gewölbe vor und nach der Sprengung der Stütze (Zone 3) bestimmen.

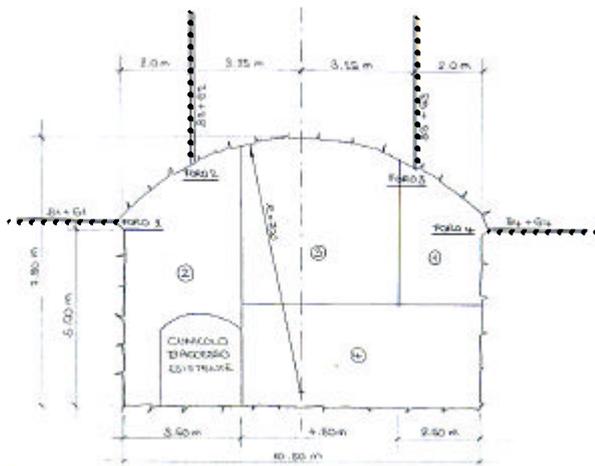


Abbildung 20: Luzzzone - Tunnelschnitt H (TI)

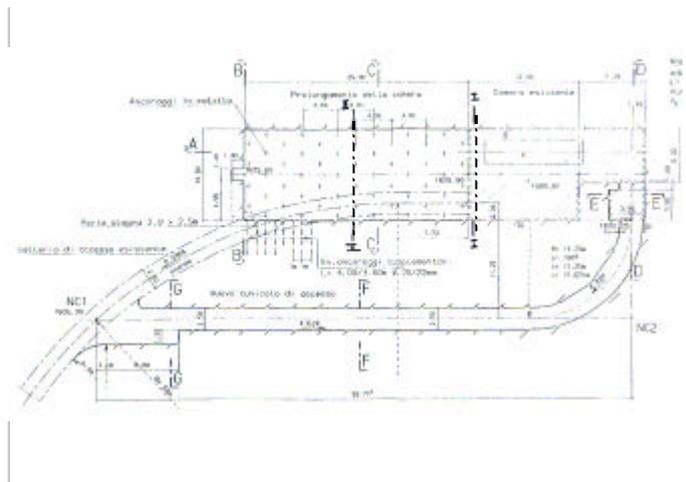


Abbildung 21: Luzzzone – Tunnelsituation (TI)

Die Resultate zeigten, dass die Bewegungen der Felsen sehr geringer waren als man erwartete und dass die vorgesehene Spritzbetondicke genug war. Die Verformungen blieben in der Größenordnung von 0,05 % bis 0,07 % der gemessenen Sensorenlänge, noch nach einigen Monaten.

ZUSAMMENFASSUNG

Im Bauwesen erfordert die Sicherheit eine periodische Überwachung der Bauwerke. Die derzeit benutzten Methoden (wie z.B. die Triangulation, Wasserpegel oder mechanische Extensometer) sind oft schwierig mühsam in der Anwendung und erfordern die Anwesenheit einer Fachperson oder mehrerer Fachleute. Die Komplexität und die daraus entstehenden hohen Kosten haben eine Einschränkung der periodisch durchzuführenden Kontrollen zur Folge. Die erhaltene räumliche Auflösung ist im allgemeinen schwach und nur bei der Feststellung von Anomalien im allgemeinen Verhalten wird man eine detailliertere und genauere Analyse vornehmen. Es existiert also ein reales Bedürfnis nach Verfahren, das eine automatische und permanente Überwachung im Inneren der Struktur mit höchster Präzision und mit einer befriedigenden räumlichen Auflösung ermöglicht.

In dieser Hinsicht hat sich das Konzept der intelligenten Struktur (**Smart Structure**) in vielen Bereichen des Ingenieurwesens, insbesondere in den Bereichen der Aeronautik und der Verbundbaustoffe als wirksam erwiesen. Diese Strukturart ist mit einem internen Netz von Glasfasersensoren ausgestattet, das die Überwachung unterschiedlicher kritischen Parameter (wie z.B. Deformation, Temperatur, Druck, Eindringen von chemischen Substanzen, usw.) für die Sicherheit oder für eine wirksame Planung der Unterhaltsarbeiten ermöglicht.

Diese Glasfasersensoren weisen gegenüber herkömmlichen Messmethoden **erhebliche Vorteile** auf. Erwähnt seien hier die hohe Präzision, die niedrigen Kosten der Messungen, das große Spektrum von messbaren Parametern, die Unempfindlichkeit gegenüber Temperatur, elektromagnetischen Feldern (Hochspannungsleitungen, Züge, Gewitter) und gegen Korrosion. Weitere Vorteile sind die kleinen Abmessungen, die Flexibilität in der Anwendung und die große Menge an Informationen, die gewonnen werden kann.

Die Anwendung des Konzeptes der intelligenten Struktur im Bauwesen erschließt neue Wege auf dem Gebiet der kurz- und langfristigen Überwachung von bedeutenden Bauwerken wie Brücken, Tunnels, Staumauern, Landepisten, größeren Überdeckungen, Geostrukturen, Fels- und Bodenmechanik, usw.