

TITEL:

"GLOBALE BAUWERKSÜBERWACHUNG MIT LICHTWELLENLEITERSENSOREN – FUNKTIONSWEISE DES SYSTEMS SOFO® UND ANWENDUNGSBEISPIELE"

AUTOREN UND ADRESSEN:

Dipl. Ing. Nicoletta CASANOVA
Dipl. Ing. Giovanna COLOMBO
ISTITUTO MECCANICA DEI MATERIALI SA
Via al Molino 6
CH-6916 GRANCIA, SWITZERLAND
Tel: ++41 91 994 83 41
Fax: ++41 91 994 85 30
e-mail: pcolombo@imm.ch

Dr. Daniele INAUDI
Dipl. Ing. Gianluca BALLERINI
SMARTEC SA
Via al Molino 6
CH-6916 GRANCIA, SWITZERLAND
Tel: ++41 91 993 09 24
Fax: ++41 91 993 09 40
e-mail: smartec@smartec.ch

Dipl. Ing. Hans PODHRADSKY
Dipl. Ing. Werner ZEMANN
RISS MESSTECHNIK GMBH
Neudorfer Strasse 110
A - 2353 GUNTRAMSDORF, AUSTRIA
Tel: ++43 223 62 28 81
Fax: ++43 223 62 24 18
e-mail: riss@netway.at

Dipl. Ing. Jochen KLING
DEHA ANKERSYSTEME & CO. KG
Breslauerstrasse 3
D – 64518 GROSS GERAU, DEUTSCHLAND
Tel: ++49 6152 939 125
Fax: ++ 49 6152 939 100
e-mail: kling@deha.com

ZUSAMMENFASSUNG

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 kritischer Parameter (wie Deformation, Temperatur, Druck, usw.) für die Projektierung, für die Sicherheit oder für eine wirtschaftliche Planung der Wartungsarbeiten 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 Eidgenössischen Technischen Hochschule von Lausanne in der Schweiz entwickelt, zusammen mit industriellen Partnern im Feld getestet und wird heute von der Firma SMARTEC SA hergestellt und vermarktet.

Es handelt sich um ein Messsystem mit Glasfasersensoren, die zwischen zwei Punkten in der Struktur die Verformungen mit einer Auflösung von 2/1000 mm aufnehmen.

Das System ist besonders stabil und wurde bereits in zahlreichen Bauwerken, wie Brücken, Tunnels, Staudämmen, Pfählen, Verankerungen, usw. eingesetzt.

1. EINFÜHRUNG

Die Verwaltung und die Sicherheit sämtlicher Bauwerke – insbesondere in der Geotechnik – erfordern eine periodische Überwachung, die eine wirtschaftliche Planung der Wartungs- und Sanierungsarbeiten ermöglicht.

Grosse, nicht stabile Verformungen werden oft beobachtet und, auch wenn diese die Sicherheit der Bauwerke nicht beeinträchtigen, könnten sie die Gebrauchstauglichkeit beeinträchtigen.

Verbesserte Kenntnisse des Bauwerkverhaltens werden immer wichtiger, besonderes im Hinblick auf neu entwickelte Baustoffe und Bautechnologien und auch weil oft die Lebensdauer der Bauwerke länger als ursprünglich geplant gewährleistet werden soll.

Eine Überwachung während der Bauphase und danach über einen längeren Zeitraum ermöglicht, diese Kenntnisse zu verbessern und das tatsächliche Verhalten der Bauwerke zu erkennen und zu verstehen, sowie auch eine wirtschaftliche Planung der Wartungs- und Sanierungsarbeiten.

Für eine Langzeitüberwachung ist ein genaues und stabiles Messsystem erforderlich; hingegen benötigt sie kurzzeitig ein System, das die Verformungen sehr schnell messen kann. Traditionelle Aufnehmer – wie Induktionsaufnehmer, mechanische Extensometer, Theodolite, Lichtwellenleitersensoren nach dem Prinzip der "microbending", usw., sind sehr gut zur Messung in einem begrenzten Frequenzbereich geeignet. Andere Messsysteme geben zu wenig Aufschluß über die gewünschten Parameter oder haben eine zu geringe Genauigkeit.

Für spezielle Anwendungen ist ein dringender Bedarf nach einem einzelnen Messsystem, welches Strukturverformungen über ein breites Frequenzspektrum abdecken kann.

2. BESCHREIBUNG DER METHODE SOFO®

In den letzten Jahren, gewannen die Glasfasersensoren im Bereich der Bauwesentechnologie immer mehr an Bedeutung. Heutzutage werden Sie bereits für zahlreiche Anwendungen, dank der einfachen Installation, der Unempfindlichkeit gegen elektromagnetische Felder, Temperatur, Feuchtigkeit und weil sie ermöglichen, Verformungen von wenigen Microns bis zu einigen Zentimetern (% der Länge) anzuzeigen, eingesetzt.

Das Labor IMAC („Institut de mesures et analyses des contraintes“ an der „Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne“ – CH) hat ein Bauwerksüberwachungssystem entwickelt, das auf dem Prinzip der Interferometrie in niederer Kohärenz beruht und schon in vielen Bauwerken wie Brücken, Tunneln, Staudämmen, usw. mit Erfolg angewendet wurde.

Das System heisst SOFO®. Der Name ist die Abkürzung von "Surveillance d'Ouvrages par Fibres Optiques" (Strukturüberwachung mit optischen Glasfasersensoren).

2.1 Die Methode SOFO®

Die Methode SOFO® beruht auf dem Prinzip der Interferometrie in niederer Kohärenz (siehe dazu Abbildung 2.1.1). Die infrarote Emission einer LED (Lichtemittierende Diode) wird in eine singlemode Faser vom Standard-Typ Telecom eingestrahlt 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 folgt den Verformungen. 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 auch aus zwei Fasern, deren Längenunterschied von einem beweglichen Spiegel präzise gemessen wird. Beim Verschieben des Spiegels erzielt man nur dann eine Modulierung 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 kleinster Verformungen geeignet, die sich auch über mehrere Jahre erstrecken können, ohne dass der Nullpunkt verloren geht.

Die Methode SOFO® ist in der Abbildung 2.1.1 dargestellt.

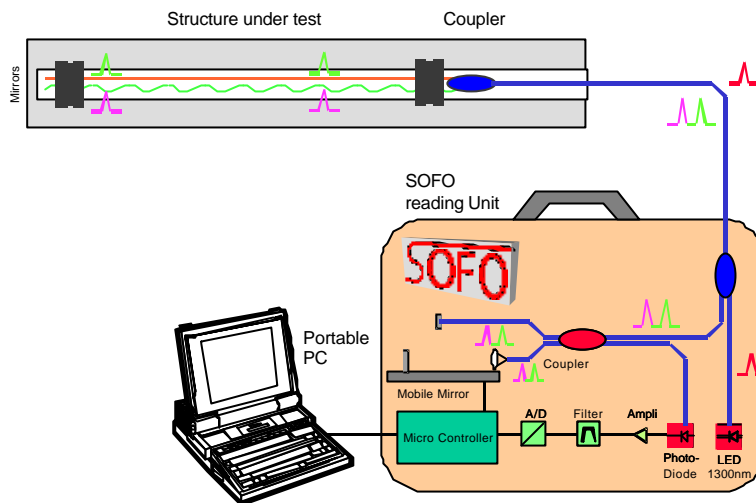


Abb. 2.1.1: Messsystem SOFO®



Abb. 2.1.2: SOFO-Messeinheit mit externen PC

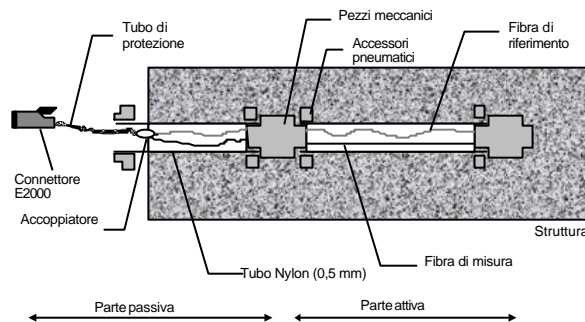


Abb. 2.1.3: Standard-Sensor SOFO®

Das Messgerät ist tragbar, wasserdicht und batteriebetrieben, und daher auch für die Anwendung auf Baustellen geeignet. Jede Messung dauert etwa 10 Sek. und die Daten werden automatisch in der Datenbank gespeichert.

Messungen an mehreren Sensoren können manuell oder automatisch mittels eines optischen Schalters durchgeführt werden. Da die Längendifferenz zwischen den zwei Fasern absolut ist, ist eine permanente Verbindung der Sensoren am Apparat nicht notwendig. Auch kann ein einziges Gerät für mehrere Sensoren an verschiedenen Bauwerken eingesetzt werden. Wenn Messungen regelmässig wiederholt werden, kann der Verlauf der Verformungen ohne laufende Überwachung vor Ort bestimmt werden.

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

Sensorenlänge:	20 cm bis 10 m für jeden Messabschnitt Spezielle Sensoren bis 50 m für spezielle Anwendungen
Auflösung:	2 µm (2/1000 mm), unabhängig von der Messlänge
Messbereich:	1,0% Dehnung und 0,5% Stauchung, erweiterbar
Messgenauigkeit:	Kleiner als 0.2 % der gemessenen Verformung
Dauer einer Messung:	Weniger als 10 Sek. für jeden Sensor
Abweichung: (Nullpunktconvergenz)	Nach 5 Jahren Benutzung nicht feststellbar
Unabhängigkeit von:	Temperatur, Feuchtigkeit, Vibrationen, Korrosion und elektromagnetischen Feldern
Messgerät:	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

3. ÜBERWACHUNG VON BAUWERKEN MIT SOFO®-GLASFASERSENSOREN

Die SOFO®-Sensoren können zur Überwachung verschiedener Arten von Verformungen und Bauwerken zum Einsatz kommen. Im folgenden konzentrieren wir uns auf das Gebiet der Geotechnik.

3.1 Optisches Mehrfachextensometer

Im Tunnelbau und in der Geotechnik sind vorwiegend Messungen der globalen Verschiebungen als von lokalen Spannungszuständen von Wichtigkeit. In der Tat misst man gewöhnlich die Verschiebungen einer verankerten Wand oder die Hebung einer Betonplatte in einem Tunnel.

Sehr oft sind traditionelle Messverfahren nicht anwendbar, z.B. wegen der Einschränkungen beim Durchgang zu den Messpunkten oder zu den Referenzpunkten oder wegen der beschränkten Genauigkeit und räumlichen Auflösung des Messsystems.

In der Tat zeigen die traditionellen Messverfahren die Verschiebungen und Setzungen mit einem Fehler an, der meistens grösser als ± 1 mm ist. Dieser Wert kann für manche Aufgabenstellungen ausreichend sein, nicht aber in der ersten Bauphase, wo auch kleinste Verformungen erkannt werden müssen. Dafür werden Genauigkeiten zwischen 10 und 100 µm gefordert.

Auf dem Gebiet der Geotechnik (Tunnelbau, Verankerungen, u. Ä.) und zur Messung der relativen Verformungen zwischen zwei Punkten wendet das Ingenieurwesen traditionelle Vermessungsverfahren an. Ein solches Messsystem ist in der Abbildung 3.1.1 dargestellt: ein Invar-Draht wird in einem Bohrloch verankert, sodass sich der Endpunkt schon ausserhalb der Einflusszone (bis zu einigen 10 m) befindet.

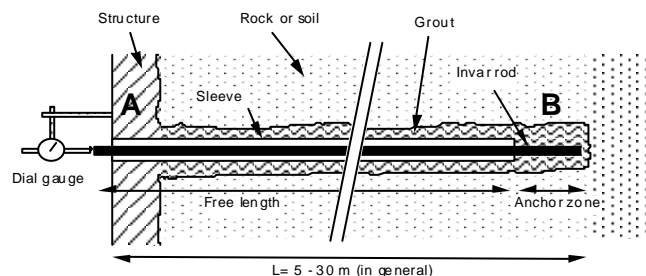


Abb. 3.1.1: Schema eines traditionellen Extensometers; die Messung ist die relative Verformung zwischen den Punkten A und B.

Der Draht verschiebt sich frei zwischen der Verankerung und der zu messenden Struktur. Die Messung der Verformung der Struktur zwischen A und B erfolgt einfach mit einer Messuhr oder einem elektrischen Wegaufnehmer (LVDT).

Die Installation eines optischen Extensometers in einem Bohrloch erfolgt ähnlich wie für die traditionellen Messsysteme und ist in Abbildung 3.1.2 dargestellt:

a) im Fall eines einzelnen Messabschnitts: die Messung bestimmt die relative Verformung zwischen den Punkten A und B,

hingegen

b) im Fall mehrerer Messabschnitte: die Messung bestimmt die relative Verformung zwischen den Punkten 1 und 2, 2 und 3, usw..

Die Lichtwellenleiter werden sowohl zur Messung der sogenannten „Aktiven Zone“ (Sensor), als auch zur Übertragung der Messung (Datenleitung) zur Leseinheit verwendet.

Der grösste Vorteil der Lichtwellenleitersensoren SOFO® im Vergleich zu den traditionellen Extensometern besteht :

- in der hohen Auflösung und Genauigkeit
- in der Möglichkeit, eine grosse Anzahl Messabschnitten (Sensoren) in ein relativ kleines Bohrloch einzusetzen
- in dem freien Kopf der Bohrloches (kein Weggeber muss vorhanden sein)
- in der Möglichkeit, die Sensoren automatisch und durch Fernabfrage zu bedienen (bis zu 5 km Verkabelung, danach durch Modem)
- in der einfachen und schnellen Installation und Messung.

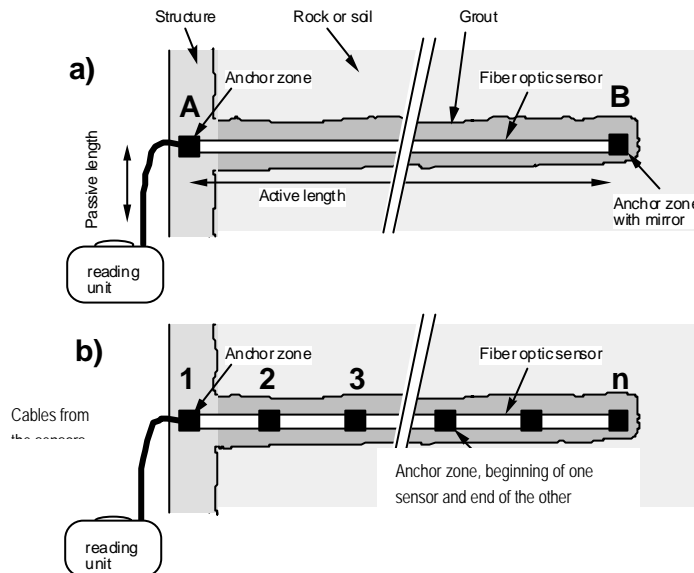


Abb. 3.1.2: Schema eines optischen Extensometers SOFO®

3.2 Messung von Krümmungen

Paarweise Anordnung von SOFO®-Sensoren ermöglichen die Bestimmung der mittleren Krümmungsänderungen sowohl an Brückenplatten als auch in Tunnel-Gewölben (Paare von parallelen Sensoren werden so installiert, wie es in der Abbildung 3.2.1 dargestellt ist). Es ist zu beachten, dass die Sensoren nicht unbedingt auf einer Geraden installiert werden müssen, sondern sie können an die gegebene Form des Felsens angepasst werden.

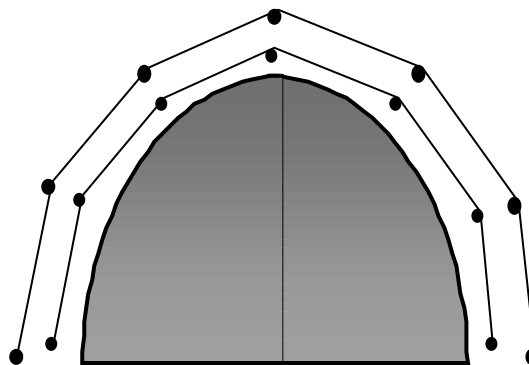


Abbildung 3.2.1: Installation von SOFO®-Sensoren zur Bestimmung der Krümmungen und der Analyse der Konvergenz

Wenn eine genügende Anzahl Sensoren vorhanden ist, kann die Tunnel-Konvergenz durch doppelte Integration der Krümmungsmessungen berechnet werden. Diese Technik wird normalerweise zur Bestimmung der vertikalen Durchbiegungen bei Brücken aus der Messung von horizontalen Verformungen angewendet. Dank der hohen Auflösung des SOFO® -Messsystems ist die Genauigkeit bei der Bestimmung von Konvergenzen von typischen Tunnelprofilen in der Grössenordnung von 0.1-1 mm.

Der grösste Vorteil der Lichtwellenleitersensoren SOFO® in diesem verfahren besteht:

- im Freibleiben des Tunnelprofils (unbehinderter Durchgang, daher Messungen während des Betriebs möglich)
- in der Möglichkeit, die Sensoren automatisch und durch Fernabfrage zu bedienen (bis zu 5 km Verkabelung, danach durch Modem)
- in der einfachen und schnellen Installation und Messdurchführung.

3.3 Beurteilung der Materialeigenschaften und Analyse der Verformungen

Eine interessante Anwendung der SOFO®-Sensoren ist die Installation direkt im Beton, in Mörtelinjektionen, im Zement, oder im Spritzbeton. Dies ermöglicht die Messung der Verformungen sofort nach dem Einbetonieren und danach über einen beliebig langen Zeitraum.

Die Sensoren können somit die durch den Hydratationsprozess verursachte thermischen Verformungen des Betons messen, das Schwindverhalten bestimmen sowie die durch Belastung verursachten Durchbiegungen berechnen. Die SOFO®-Sensoren können auch zur Bestimmung der Haftung zwischen zwei Schichten (z.B. zwischen Alt- und Neubeton oder verschiedenen Materialien wie Fels-Mörtel, Beton-Stahl,...) verwendet werden.

Diese Messungen können zur Verbesserung von Betonmischungen angewendet werden, sodass die internen Spannungen, die zur Bildung von Rissen führen, weitgehend reduziert werden.

3. ANWENDUNGSBEISPIELE: KURZ- UND LANGZEITIGÜBERWACHUNG

In den nächsten Abschnitten werden einige Anwendungen des SOFO®-Systems vorgestellt. Insbesondere behandeln diese Anwendungen die Strukturüberwachung mit unterschiedlicher Zielsetzung für Projektierung, Bau und Wartung der Bauwerke auf dem Gebiet der Geotechnik.

4.1 Tunnel Mt. Terri (Kanton Waadt - CH)

Im Jahr 1998 wurden 9 SOFO®-Sensoren im Tunnel Mt. Terri zur Beurteilung der Entspannung vom Fels während des Vortriebs installiert. Hauptziel der Installation war das Studium des Auftretens von Rissen im Fels und des dazugehörigen Impermeabilitätsverlustes. Die Ergebnisse der Messungen wurden auch zur Bewertung der Einsatztauglichkeit von einem solchen Material für die Überdeckung und den Schutz einer Deponie für Kernatomschlacke verwendet.

Vom bestehenden Tunnel aus - parallel zum neu erbauten Tunnel - wurde eine Kette von 9 SOFO®-Sensoren in ein Bohrloch Richtung neuen Tunnel installiert und injiziert. Die sogenannte aktive Länge der Sensoren wurde so gewählt, dass sich nahe des neuen Tunnels eine größere Anzahl ergab: die ersten 4 Sensoren am Bohrlochkopf wiesen eine Länge von 250 mm, die folgenden 2 eine Länge von 500 mm und die restlichen eine Länge von 1 m, 2 m bzw. 4 m (siehe dazu Abbildung 4.1.1).

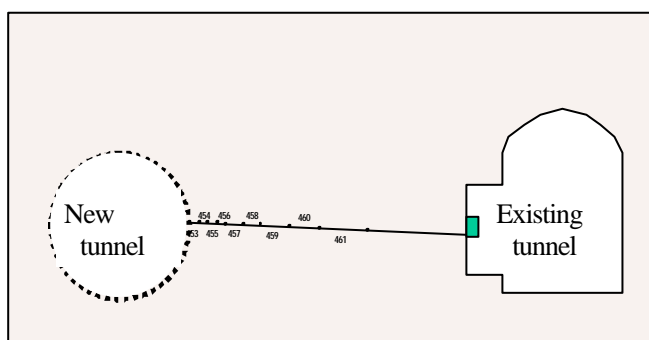


Abb. 4.1.1: Installation eines optischen Extensometer im Tunnel Mt. Terri

Sämtliche Sensoren wurden in ein einziges Bohrloch mit $\varnothing = 100$ mm installiert; es hätte auch ein Bohrloch mit $\varnothing = 80$ mm genügt.

Die Abbildung 4.1.2 zeigt die aufgenommenen Dehnungen (gemessene Verformungen geteilt durch die Messlänge jedes Sensors). Bevor die Tunnelbohrmaschine bis zum optischen Extensometer kam, wurde keine relevante Verformung beobachtet. Hingegen, nach der Tunnelbohrmaschine wurde eine markante Verformung der ersten 4-5 Sensoren und eine geringere Verformung der restlichen Sensoren aufgenommen. Die grosse Dehnung des Sensors Nr. 453 kann mit der Öffnung eines Risses erklärt werden.

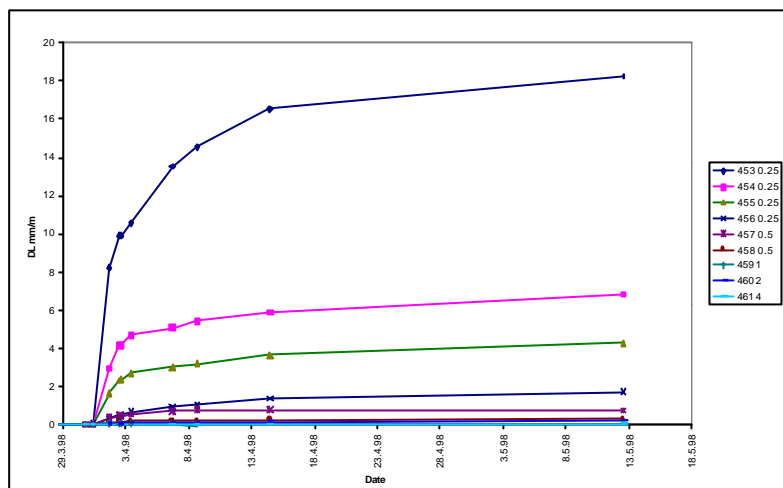


Abb. 4.1.2: Messungen der Dehnungen mm/m im Tunnel Mt. Terri nach dem Vorbeifahren der Tunnelbohrmaschine - Sensor Nr. 453 am Kopf (Seite neues Tunnels), Sensor Nr. 461 am Fuss (Seite existierendes Tunnels)

Diese Anwendung nutzt die besonderen Eigenschaften und Vorteile des SOFO®-Systems: einerseits ist es möglich, die Messlänge der Sensoren an die zu überwachende Zone anzupassen; andererseits ist der Messbereich sehr breit, was die Bestimmung von sehr kleinen bis zu sehr grossen Verformungen ermöglicht, ohne vorherige Kenntnisse der Verschiebungen, die zu erwarten sind. Zusätzlich, dank der Abwesenheit von beweglichen und mechanischen Teilen, ist die Gefahr eines Bruchs aufgrund von Scherspannungen stark reduziert.

4.2 Verankerung am Ufer des Luganersees (Kanton Tessin – CH)

Das Ufer des Luganersees ist auf einer Länge von 150 m instabil. Diese Instabilität ist durch die Geologie bedingt: es handelt sich um Schichten von Seeablagerungen (v.a. normal konsolidierte, organische Silte) und einige Linsen mit Flussablagerungen (Sand und Kies). Die Ufergrenze wurde sogar am Anfang des Jahrhunderts mit Lockermaterial erweitert und weist heute relativ hohe Neigungen auf.

Im Rahmen des Sanierungsprojektes hat das beauftragte Bauingenieurbüro einen Schirm von verankerten Pfählen vorgesehen. Da Bauingenieurbüro hat verschiedene Laborprüfungen und Untersuchungen vor Ort mit folgender Zielsetzung durchgeführt:

- die Technik zu studieren
- die Optimierung der verschiedenen Verankerungsverfahren in diesen besonderen Materialien (Seeablagerungen und Sand und Kies) zu erreichen
- die Eigenschaften dieser Materialien zu überprüfen
- die Verschiebungen zu bestimmen
- die Tauglichkeit der Verankerungen zu beurteilen.

Insbesondere zur Optimierung der Verankerungslänge, zur Festlegung eventueller Probleme bei der Bohrung und zur Bestimmung der maximalen Belastung, wurden 4 Prüfverankerungen mit Injektion in der Sandschicht bzw. in den Seeablagerungen mit verschiedenen Verfahren realisiert.

Jede Verankerung weist eine verankerte Länge von 10 m auf, und sie wurden wie folgt realisiert (siehe dazu auch Abbildung 4.2.1):

- verankerte Länge mittels Mehrfachinjektion in den Seeablagerungen
- verankerte Länge mittels Jetting in den Seeablagerungen
- verankerte Länge mittels Mehrfachinjektion in einer Linse von Sand und Kies
- verankerte Länge mittels Jetting in einer Linse von Sand und Kies.

Die SOFO®-Sensoren wurden in der verankerten Zone zur Überprüfung der optimalen Länge der Verankerung eingesetzt, was auch zur Bestimmung des Verhaltens bezüglich der Spannungsverteilung zwischen Verankerung und Boden (kurz- und langfristig) führt..

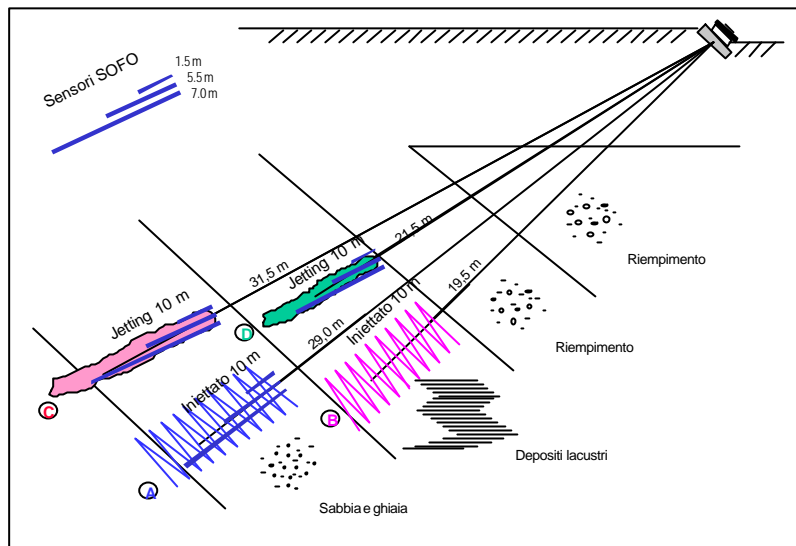


Abb. 4.2.1: Darstellung der 4 Prüfverankerungen (B, C und D mit Messsystem)

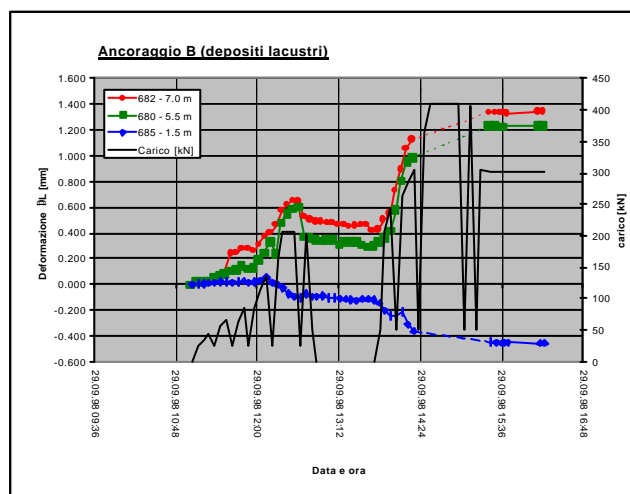
3 Ketten von je 3 SOFO®-Sensoren wurden an den Lizen der Verankerungen im Werk befestigt (die Verankerung, die dann mit dem traditionellen Verfahren in der Schicht aus Seeablagerungen injiziert wurde, wurde nicht ausgerüstet). Jede Sensorenkette fing beim Kopf der Injektionssäule (nach dem freiem Teil der Verankerung) an. Die Längen der Sensoren betragen 1,5 m, 5,5 m und 7,0 m. Die Messungen erfolgten sowohl während der Belastungsversuche als auch langfristig, um die Beziehung zwischen Lastverlust am Kopf des Pfahls und Verhalten des verankerten Teils zu bestimmen.

4.2.1 Verankerung B (Silte)

Gerade auf der Silt-Schicht (wo die Verankerung injiziert wurde) liegt eine Schicht aus Füllsand (Lockermaterial). In der Abbildung 4.2.1.1 sind die Messungen der Sensoren der Verankerung B während der Belastungsversuche dargestellt.

Der erste Sensor (am Kopf, Nr. 685, 1,5 m lang) zeigt eine Verkürzung über 1,5 m der verankerten Zone. Ein ähnliches Verhalten vom zweiten (Nr. 680, 5,5 m lang) und dritten Sensor (Nr. 682, 7,0 m lang) lässt die Behauptung zu, dass der letzte Teil von 1,5 m zu keiner erheblichen Erhöhung der Spannungsverteilung zwischen Verankerung und Boden führt (der Unterschied zwischen den Messungen des zweiten und des dritten Sensors ist sehr gering bis null, d.h. dass die Verformungen im letzten Teil auch sehr gering oder sogar null sind).

Die wenigen Messungen, die bei einer Belastung von etwa 300 kN durchgeführt wurden, zeigen eine Verringerung der Dehnungszunahme der zwei letzten Sensoren (Sensoren 7,0 m und 5,5 m lang), was evtl. durch das Auslassen der Verankerung bedingt wurde (die Säule „rutscht“ nach oben). Der Beobachtungszeitraum hätte länger sein müssen, um durch weitere Daten ein klares Bild zu erhalten.



Die am 16.10.1999 durchgeführten Messungen zeigen deutlich eine Zunahme der Stauchung des ersten Sensors (Nr. 685, 1,5 m lang) - die Belastung Richtung Füllsand wird grösser - und eine Abnahme der Dehnung der restlichen zwei Sensoren - Verlust der Krafteinleitung in den Boden. Die Präsenz von Füllsand über dem verankerten Teil könnte somit eine wichtige Rolle in Bezug auf die Kapazität der Verankerung spielen.

4.2.2 Verankerung C (Jetting in Kies und Sand)

Auf der Sand-Schicht, wo man eine Jetting-Säule errichtet hat, liegt eine Schicht aus Silt, die schlechtere Eigenschaften als die der Sand-Schicht aufweist.

Die Jetting-Säule ist 10 m lang und könnte somit den Endteil in einer anderen Silt-Schicht unter der Linse aus Sand haben. Aus diesem Grund werden die letzten 3 m der Säule vernachlässigt.

In der Abbildung 4.2.2.1 werden die Messungen auf der Verankerung C während der Belastungsversuche dargestellt.

Der 1,5 m lange Sensor (Nr. 683), der sich am Kopf der Säule befindet, zeigt eine Stauchung, welche proportional zur Belastung zu sein scheint.

Das identische Verhalten der zwei weiteren Sensoren (Nr. 678, 5,5 m lang und Nr. 681, 7,0 m lang) lassen die Behauptung zu, dass der letzte 1,5 m lange Teil der Säule unwirksam (keine Verformung) ist. Die Korrelation zwischen Verhalten der Säule und Belastung am Kopf der Verankerung ist ausgeprägt.

Die letzte Belastungsstufe zwischen 1'200 kN und 1'400 kN zeigt eine plötzliche Abnahme der Dehnung der zwei letzten Sensoren (Nr. 678, 5,5 m lang und Nr. 681, 7,0 m lang), hingegen zeigt der Sensor am Kopf eine Stauchung, die mit Verzögerung abnimmt. Man kann behaupten, dass sich die Säule nach oben wegen der Überschreitung der Mantelreibung bewegt; hingegen nimmt die Spitze der Säule noch während einer kurzen Zeit die Belastung auf.

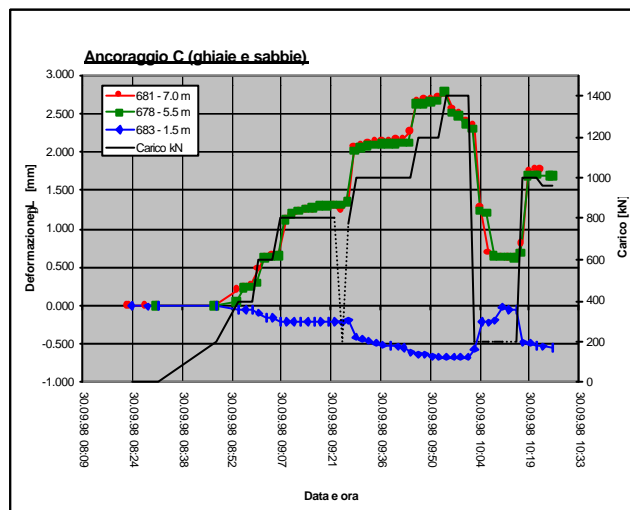


Abb. 4.2.2.1: Belastungsversuche - Verankerung C

Die am 16.10.1999 geführten Messungen zeigen deutlich eine Abnahme der Stauchung vom ersten Sensor (Nr. 685, 1,5 m lang) (die Belastung Richtung Silt wird kleiner) und eine Abnahme der Dehnung von den restlichen zwei Sensoren (Verlust der Krafteinleitung in den Boden).

4.2.3 Verankerung D (Jetting im Silt)

Auf der Silt-Schicht, wo man eine Jetting-Säule errichtet hat, liegt eine Schicht aus Füllsand, die bessere Eigenschaften als jene der Silt-Schicht aufweist.

Die Jetting-Säule ist 10 m lang und könnte daher mit den Endteil in die Sand-Kies-Schicht hineinragen. Dieses Endteil könnte einen positiven Einfluss auf die maximale Belastung haben, wird aber vernachlässigt, weil die Lizen im verankerten Teil nur eine Länge von 7 m aufweisen (keine Übertragung der Zugkräfte der Säule).

In Abbildung 4.2.3.1 werden die Messungen auf der Verankerung C während der Belastungsversuche dargestellt.

Der 1,5 m lange Sensor (Nr. 686), der sich am Kopf der Säule befindet, zeigt eine Stauchung an, die anscheinend proportional zur Belastung ist. Nach der Entlastung, zeigt der Sensor aber keine Abnahme der durch die Druckkräfte bedingten Verformungen.

Das Verhalten des Sensors Nr. 679 (5,5 m lang) zeigt eine anfängliche Dehnung, hingegen bei höherer Belastung (zB. > 220 kN) eine Stauchung, was einer Verschiebung des verankerten Teils Richtung Kopf der Verankerung entspricht.

Diese Änderung des Verhaltens betrifft dann auch das Verhalten des Endteils der Säule: der Sensor Nr. 684 (7,0 m lang) verlängert sich plötzlich, und somit werden die Mantelreibungen zur Kräfteinleitung in den Boden aktiviert.

Es ist zu beachten, dass der Sensor Nr. 686 (1,5 m lang) die Grenze des Messbereichs in Richtung der Stauchung (zu stark verkürzt) überschritten hat.

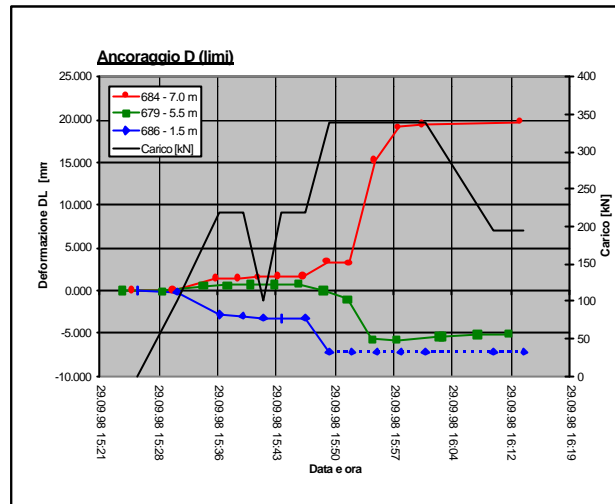


Abb. 4.2.3.1: Belastungsversuche - Verankerung D

Die am 16.10.1999 durchgeführten Messungen zeigen deutlich eine Abnahme der Stauchung vom ersten und zweiten Sensor (Nr. 686, 1,5 m lang und Nr. 679, 5,5 m lang) - die Belastung in Richtung Füllsand wird kleiner - und eine starke Abnahme der Verformungen des dritten Sensors. Die Erklärung eines solchen Verhaltens kann nur mit einer zusätzlichen Messkampagne geklärt werden.

4.3 Pfahlbelastungsversuche (Kanton Luzern – CH)

Für den Bau des Tagbautunnels Spier in Ennethorw im Herbst 1997 wurden 3 Pfahlbelastungsversuche durchgeführt. Die Pfähle sind schwimmende Schleuderbeton-Fertigpfähle $\varnothing = 45$ cm, die vorwiegend in tonig-siltig-sandigen Seeablagerungen liegen, welche unregelmässig von Bachablagerungen durchsetzt sind. In den 3 Probepfählen wurden im zentral vorhandenen Hohlraum ($\varnothing =$ ca. 70 mm) und auf einer Länge von ca. 22-26 m je eine Sensorenkette eingebaut und mit expansivem Mörtel (mit tiefem E_m) injiziert. Die 7-8 Sensoren jeder Kette hatten eine Länge von 3-4 m.

Ziel der Messungen war, die Mantelreibung und die maximale Festigkeit durch Belastungsversuche (Prüflast von bis 2'000 kN) zu bestimmen.

Das SOFO®-Messsystem wurde vom Auftraggeber ausgewählt, da die Präzision, Zuverlässigkeit, und die Vereinfachung der Belastungsausrüstung (keine Anpassung des Pfahlkopfes notwendig) und vor allem, weil die Sensoren schnell und problemlos installiert und automatisch gemessen werden können.

Vor, während, und nach den Belastungsversuchen wurden die Sensoren automatisch mittels eines optischen Schalters gemessen.

In der Abbildung 4.3.1 werden die Verformungen eines Pfahls während des Belastungsversuchs dargestellt. Jede Kurve stellt die Verformung eines Sensors dar. Sehr gut ersichtlich sind die verschiedenen Stauchungen in Bezug auf die Abschnitte der Sensoren und die Abnahme der Verformungen mit zunehmender Tiefe aufgrund der Wirkung der Mantelreibung.

In der Abbildung 4.3.2 werden die Verformungen im Bezug auf die Tiefe der Sensoren dargestellt.

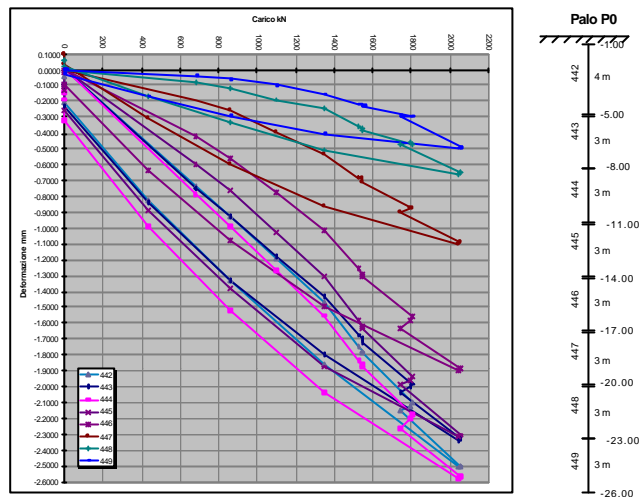


Abb. 4.3.1: Graph Belastung – Verformung der Sensorenkette und die Position/Länge jedes Sensors im Pfahl

Es ist gut ersichtlich, wie sich der Pfahl in den verschiedenen Abschnitten verkürzt und wie stark die Verformungen mit steigender Tiefe abnehmen (Einfluss der Mantelreibung).

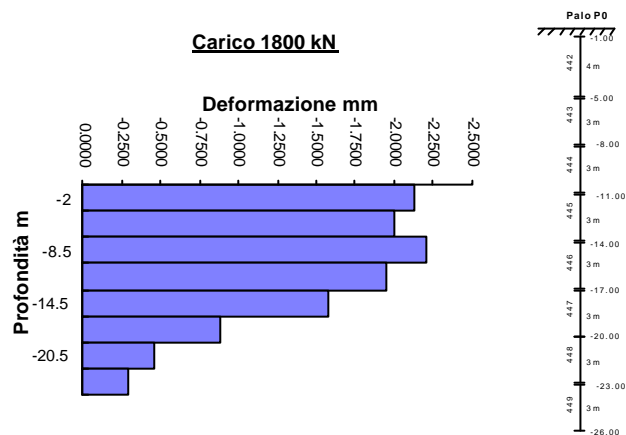


Abb. 4.3.2: Graph Tiefe – Verformung der Sensorenkette bei der Belastungsstufe von 1'800 kN und die Position/Länge jedes Sensors im Pfahl

Die Messungen ermöglichten, die Senkungen der Pfähle in Bezug auf die Belastung und dem Zeitverlauf zu bestimmen, die Mantelreibung zu berechnen, die Druckfestigkeit der Pfähle zu überprüfen und die Parameter des Bodens zu bewerten. Ausserdem konnte die optimale Länge der Pfähle bestimmt werden.

5. ZUSAMMENFASSUNG

Die Vorteile der Strukturüberwachung während der Belastungsversuche, der Bauausführung, der Inbetriebnahme und die Langzeitüberwachung wurden verdeutlicht. Eine regelmässige Überwachung oder die Inbetriebnahme eines Bauwerkes können die Kenntnisse über das Verhalten erweitern, die zur Projektierung wichtigen Parameter (Kosten, Bemessung,...) bestimmen, die Sicherheit gewährleisten und die Sanierungsarbeiten zu planen helfen, was zur Bestimmung und Planung der Gesamtkosten des Bauwerkes während der gesamten Lebensdauer führen soll.

Sensoren, die auf einer langen Basis messen können (z.B. bis zu 10 m) geben sehr aufschlussreiches Bild über das globale Verhalten eines Bauwerkes.

Auf dem Gebiet des Tunnelbaus ist es möglich, die SOFO®-Sensoren als optische Mehrfachextensometer oder zur Überwachung der Konvergenz (mit der doppelten Integration der Krümmung) oder zur Bestimmung des Verhaltens der Eigenschaften von Beton oder Spritzbeton anzuwenden.

Im Fall von Ankerwänden, Verankerungen und Pfählen, geben die SOFO®-Sensoren sehr interessante Auskünfte sowohl betreffend der Verschiebungen oder Senkungen der Struktur, als auch die zur Projektierung notwendigen Parameter zur Optimierung von technischen Lösungen.

Das SOFO®-Messsystem besteht aus einem tragbaren Messgerät, den verschiedenen Sensoren (diese können sowohl einbetoniert als auch auf der Oberfläche befestigt werden) und der zugehörigen Software (zur Messung und Analyse der Daten). Dieses System wurde bereits bei mehreren Tunneln, Brücken, Dämmen usw. eingesetzt, um das lang- und kurzfristige Verhalten des Bauwerks zu bestimmen.

6. REFERENZEN

Inaudi D., Casanova N., Kronenberg P., Vurpillot S., 1997, "Embedded and surface mounted sensors for civil structural monitoring", Smart Structures and Materials, San Diego Mars 1997, SPIE Vol. 3044-23

Perregaux N., Vurpillot S., Tosco J.-S., Inaudi D., Burdet O., 1998, "Vertical Displacement of Bridges using the SOFO System: a Fiber Optic Monitoring Method for Structures", 12th ASCE Engineering Mechanics. San Diego, La Jolla, May 1998

Inaudi D., Casanova N., Glisic B., Kronenberg P., Lloret S., Pflug L., Vurpillot S., 1998, "SOFO: Structural Monitoring with Optical Fiber Deformations Sensors"

Inaudi D., Casanova N., Steinmann G., Mathier J.-F., Martinola G., 1998, "SOFO: Tunnel Monitoring with Fiber Optic Sensors", Reducing Risk in Tunnel Design and Construction, Basel, December 1998

Vuillet L., Casanova N., Inaudi D., Osa-Wyser A., Vurpillot S., 1996, "Development and laboratory tests of deformation fiber optic sensors for civil engineering applications", International Symposium on Lasers, Optics and Vision for Productivity in Manufacturing, Europto Series, Besançon, 10-14 June 1996

Colombo G., Luvini E., Studio di ingegneria Passera & Pedretti SA di CH-6916 Grancia, 1998, "Acquisizione dati seconda parte – Ancoraggi di prova", Descrizione e risultati delle prove in situ, Ottobre 1998

7. SUMMARY

The security of civil engineering works demands a periodical monitoring of the structures. In the case of many structures including tunnels, bridges, dams and historical monuments, deformations are the most relevant parameter to be monitored.

The current methods (such as triangulation, water levels, vibrating strings or mechanical extensometers) are often of tedious application and require the intervention of specialized operators. The resulting complexity and costs limit the frequency of these measurements. The obtained spatial resolution is in general low and only the presence of anomalies in the global behavior urges a deeper and more precise evaluation. There is therefore a real need for a tool allowing an automatic and permanent monitoring from within the structure itself and with high precision and good spatial resolution.

In many civil structures like bridges, tunnels and dams, the deformations are the most relevant parameter to be monitored in both short and long-terms. Strain monitoring gives only local information about the material behavior and too many such sensors would therefore be necessary to gain a complete understanding of the structure's behavior.

We have found that fiber optic deformation sensors, with measurement bases of the order of one to a few meters, can give useful information both during the construction phases and in the long term.

The SOFO® ("Surveillance d'Ouvrages par Fibres Optiques") monitoring system is based on the use of fiber optic deformation sensors. It measures deformations between two given points in the structure being 20cm to 10m apart. The resolution is of 2/1000 mm independently from the gage length and is guaranteed also for periods of many years.

The measurement system is composed of deformation sensors (that can be installed directly into concrete, into a grout injection or on the surface of existing structures), a fiber optic cable network and a reading unit with data acquisition and management software. Further data treatment software packages are also available.

The SOFO® system is particularly suited for the monitoring of deformation in the short and long term and has been successfully applied to the monitoring of a number of structures including bridges dams tunnels, piles, anchorages and anchored walls.

This paper presents in particular the results relative to some of these applications.