

---

# Die Bedeutung von faseroptischen Messsystemen für ingeniergeodätische Überwachungsmessungen

---

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Werner Lienhart

Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme, Technische Universität Graz

---

## 1. Einleitung

---

Das Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme (IGMS) der TU Graz hat mehr als 10 Jahre Erfahrung im praktischen Einsatz von faseroptischen Sensoren für die Überwachung von Ingenieurbauten und Rutschhängen. In diesem Beitrag wird anhand zweier Überwachungsprojekte das Potential dieser Sensoren für die Früherkennung von Deformationen aufgezeigt. In den vorgestellten Projekten werden sowohl konventionelle geodätische Messverfahren als auch faseroptische Sensoren eingesetzt. Es wird gezeigt, dass durch die Kombination der unterschiedlichen Messverfahren ein besseres Verständnis über das Deformationsverhalten des Überwachungsobjektes erhalten werden kann.

---

## 2. Deformationsmessungen eines Erddammes

---

Im Herbst 2012 wurde vom Institut für Bodenmechanik und Grundbau ein Dammbruchexperiment zur Beurteilung der Stabilität von Dämmen mit unterschiedlichen Stabilisierungsmaßnahmen durchgeführt. Dabei wurde ein künstlich aufgeschütteter Damm durch kontrollierte vertikale Belastung durch einen Stahlträger und hydraulische Pressen bewusst zum Bruch gebracht. IGMS wurde mit den Deformationsmessungen zur Bestimmung des Zusammenhanges von Last und Deformation beauftragt.

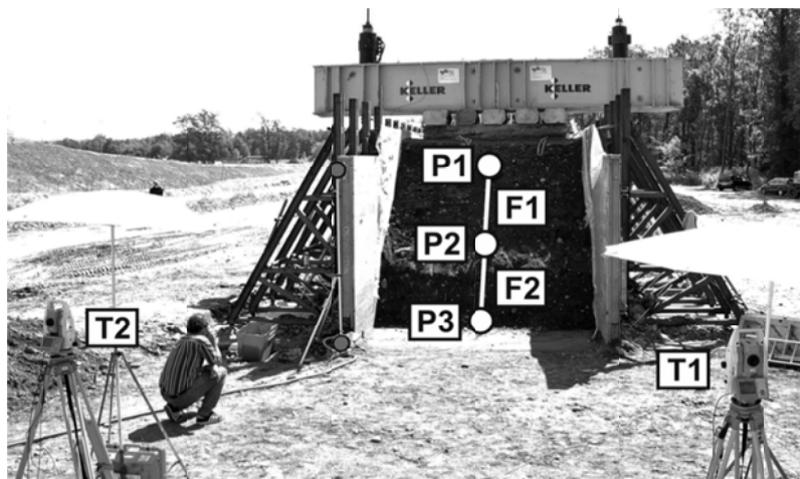


Abbildung 1: Geodätische und faseroptische Messanordnung zur Deformationsmessungen des Erddammes

Das entwickelte Messkonzept besteht aus zwei Totalstationen und zwei faseroptischen Sensoren und ist in Abb. 1 dargestellt. Am Damm wurden zwei Prismen P1 und P2 verankert. Die Koordinaten der beiden Prismen wurden kontinuierlich durch zielverfolgende Totalstationen bestimmt. Zusätzlich wurde ein fixes Referenzprisma P3 vor dem Damm auf der Betongrundplatte installiert. Zwischen den Prismen wurden zwei faseroptische Kabel (F1 und F2) mit jeweils einem Bragg Gitter gespannt. Mit diesen kann die Relativbewegung der Prismen mit hoher Auflösung und hochfrequent gemessen werden.

Abb. 2 zeigt die Ergebnisse der faseroptischen Messungen. Erkennbar ist, dass die Vertikallast stufenweise von 0 kN auf 650 kN erhöht wurde. Aufgrund der Last kommt es zu Relativbewegungen der Verankerungspunkte der Glasfasern. Im Laufe des Experimentes verkürzt sich der Abstand zwischen den Prismen P1 und P2 (obere Faser F1) um weniger als 1 mm. Die Distanz zwischen dem bewegten Prismen P2 und dem Referenzprisma P3 (untere Faser F2) verringert sich um ca. 2.5 mm.

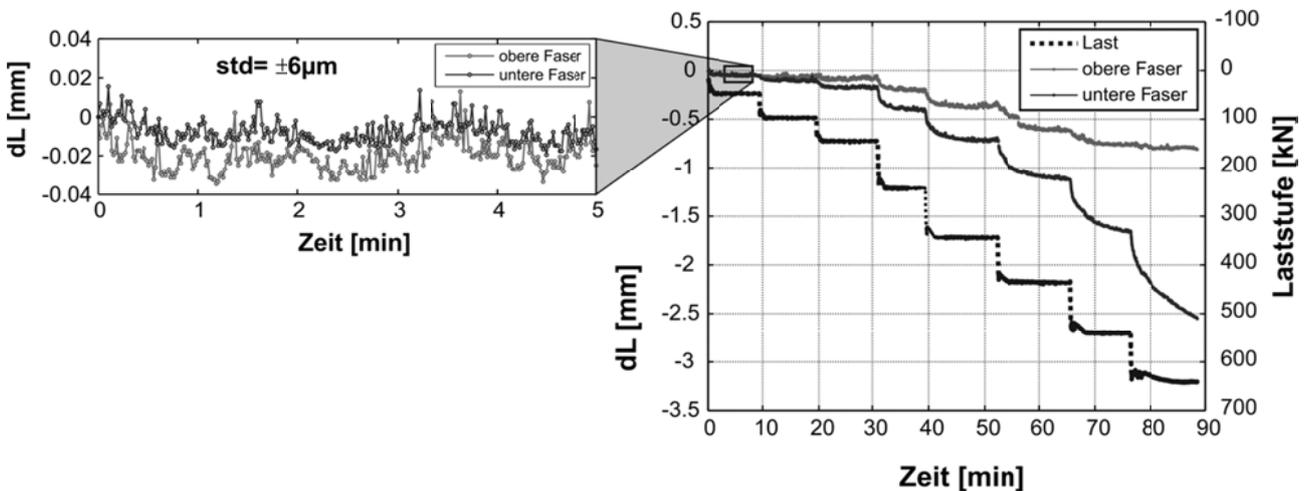


Abbildung 2: Last und Dehnungsverlauf

Aus den kontinuierlichen Messungen sind die Bewegungen während der einzelnen Laststufen klar ersichtlich. Erkennbar ist, dass die Bewegungen ein Kriechverhalten aufweisen, welches zwischen den einzelnen Laststufen nicht vollständig abklingt.

Die Messpräzision kann in einem Zeitfenster betrachtet werden, in dem keine Deformationen stattgefunden haben (Abb. 2-links). Berechnet man die Standardabweichung aus den Messungen über einen Zeitraum von fünf Minuten, dann ergibt sich eine Präzision ( $1 \sigma$ ) von  $6 \mu\text{m}$  für die Längenänderungsmessungen mit den FBG Sensoren. Damit kann mit diesen Sensoren eine wesentlich höhere Präzision als mit den geodätischen Messverfahren erreicht werden.

In Abb. 3 sind die Ergebnisse beider Verfahren gegenübergestellt. Dargestellt ist die Längenänderung der Distanz zwischen dem oberen Prisma P1 und dem Referenzprisma P3.

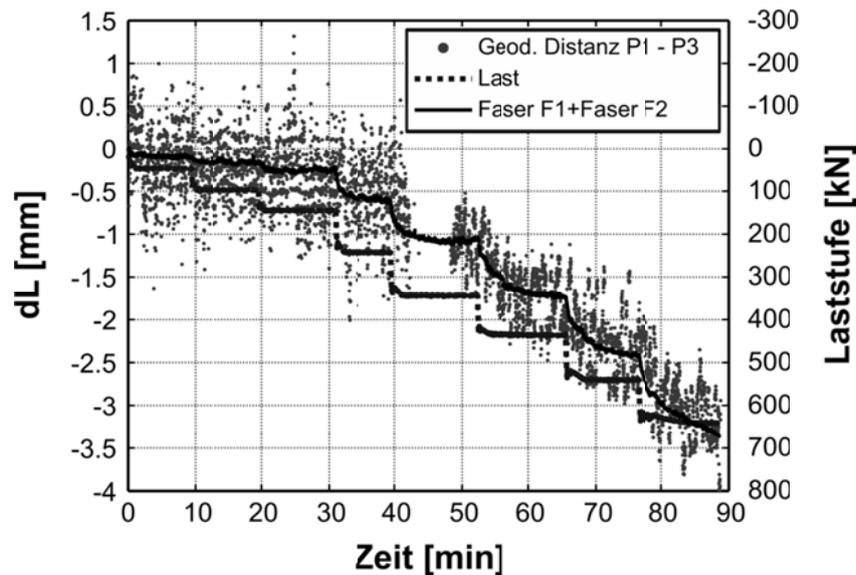


Abbildung 3: Vergleich der gemessenen Längenänderungen

Aus den faseroptischen Sensoren kann diese Längenänderung durch Summation der Längenänderungen der beiden Fasern berechnet werden. Aus den mit der Totalstation T1 dynamisch gemessenen Koordinaten des Prismas P1 und den Koordinaten des Prismas P3 kann für jeden Zeitpunkt die aktuelle Länge zwischen diesen beiden Punkten berechnet werden. Die Änderung dieser Distanz ist in Abb. 3 ebenfalls dargestellt. Erkennbar ist, dass das Gesamtdeformationsverhalten auch durch die geodätischen Messungen erfasst werden kann. Die Auflösung der einzelnen Laststufen, die Früherkennung der Deformationen und die Beobachtung des Kriechverhaltens sind jedoch nur mit den faseroptischen Sensoren möglich.

---

### 3. Deformationsmessungen am Gradenbachobservatorium

---

IGMS betreut Deformationsmessungen mit GNSS am Rutschhang Gradenbach seit 1999. Die Messungen wurden zu Beginn epochenweise durchgeführt. Seit 2009 erfolgt die Messung und Auswertung von zwei Stationen am Hang kontinuierlich und vollautomatisch. Lienhart und Brunner [2013] beschreiben die Entwicklung der geodätischen Überwachungsmessungen am Gradenbachobservatorium. Das aktuelle Deformationsverhalten des Hanges kann der Echtzeitdarstellung auf <http://gbonline.tugraz.at.at> jederzeit entnommen werden. Abb. 4 zeigt die Position der vier GNSS Monitoringpunkte und die Lage der terrestrischen Netzpunkte.

Im Jahr 2007 wurde das Messprogramm um lokale Strainmessungen erweitert. Zu diesem Zweck wurde im zentralen Bereich des Rutschhanges eine faseroptische Strainrosette in den Hang eingebettet. Diese Strainrosette befindet sich ca. 2 m unter der Oberfläche und besteht aus drei faseroptischen Sensoren vom Typ SOFO welche sternförmig angeordnet sind, siehe Abb. 4-rechts.

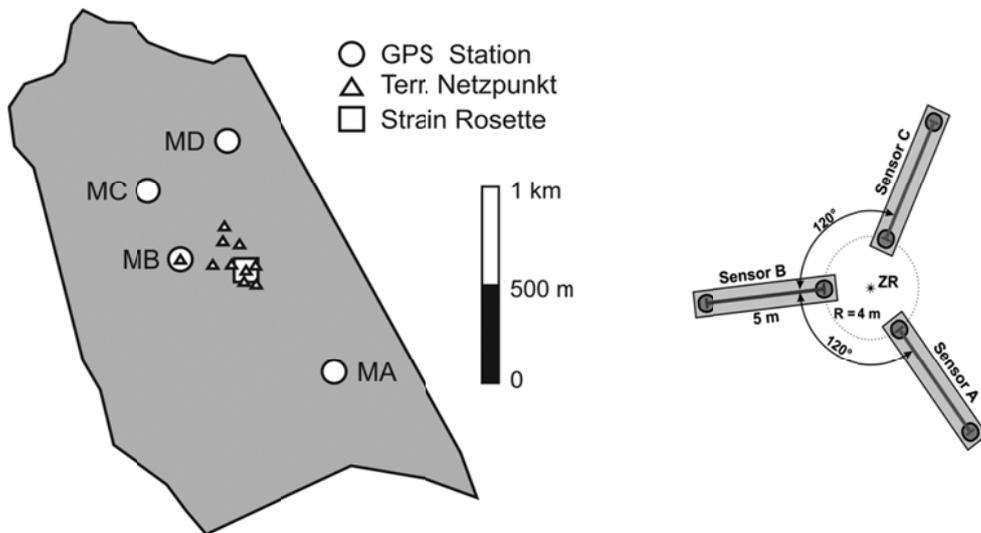


Abbildung 4: Geodätische Monitoringpunkte und faseroptische Strainrosette am Gradenbachobservatorium

Aufgrund der sternförmigen Sensoranordnung kann aus den linienförmigen Dehnungsmessungen flächenhafter Strain abgeleitet werden. Strainellipsen können auch aus den Punktbewegungen der terrestrischen Netzpunkte berechnet werden. Abb. 5 zeigt die Strainellipsen beider Messverfahren für die Beschleunigungsphase 2007-2009 und die Entspannungsphase 2009-2011.

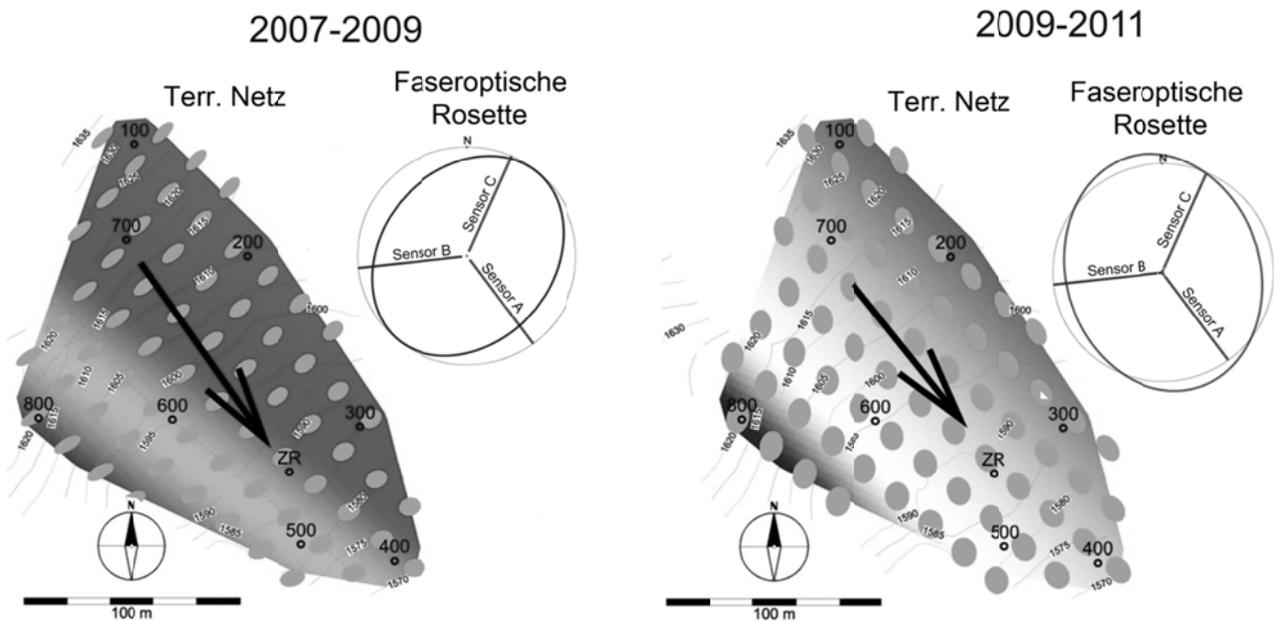


Abbildung 5: Strainellipsen während der Beschleunigungsphase 2007-2009 und der Verlangsamungsphase 2009-2011

Die terrestrischen Netzmessungen in Abb. 5 ergeben ein ähnliches Strainbild wie die faseroptischen Strainmessungen. Die Strainbestimmung ist mit der faseroptischen Strainrosette jedoch mit einer 50 mal höheren Präzision möglich. Unsere Untersuchungen zeigen, dass mit der Strainrosette die Achsen der Strainellipse

mit einer Präzision von 0.6 ppm ( $1 \sigma$ ) und die Orientierung der Strainellipse mit einer Präzision von 0.1 gon ( $1 \sigma$ ) bestimmt werden können.

Die GNSS Messungen können ebenfalls mit den faseroptischen Messungen verglichen werden. Die Distanzänderungen der Strecke MA-MC (ca. 1300 m) sind in Abb. 6 in Strain umgerechnet und als schwarze Punkte (für 4 h) dargestellt. Ebenfalls eingezeichnet ist der Strainverlauf von Sensor A, dessen Orientierung ähnlich der Strecke MA-MC ist. Ähnlich wie bei dem zuvor beschriebenen Dambruchexperiment ist wieder das wesentlich geringere Messrauschen der faseroptischen Messungen erkennbar. Bewegungsänderungen des Hanges können daher wesentlich früher detektiert werden als mit den geodätischen Messverfahren.

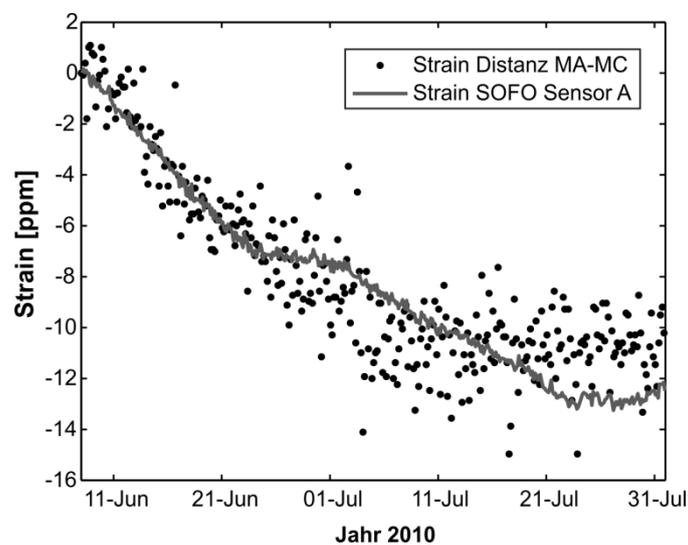


Abbildung 6: Lokaler Strainverlauf (Faseroptischer Sensor A, durchgehende Linie) und großräumiger Strainverlauf (abgeleitet aus GNSS Messungen, schwarze Punkte)

---

## 4. Schlussfolgerungen

---

Anhand der beiden Überwachungsprojekte wurde gezeigt, dass sich faseroptische Messsysteme sehr gut zur Früherkennung von Deformationen eignen. Auch in praktischen Anwendungen können mit diesen Sensoren Deformationsmessungen mit einer Präzision von wenigen 1/1000 mm durchgeführt werden. Zusätzlich bieten faseroptische Sensoren die Möglichkeit Messungen im Inneren von Objekten durchzuführen und damit Messbereiche zu erschließen, welche geodätisch nicht zugänglich sind.

---

## 5. Literaturverzeichnis

---

Lienhart, W. und Brunner, F. K. (2013). Geodätische Überwachung von gravitativen Massenbewegungen am Beispiel des Gradenbach-Observatoriums. In: *ZfV.*, 1/2013, 11 Seiten