

## Digitales Gleitmikrometer, Gleitdeformometer und Trivec

Daniel Naterop, Solexperts AG (11-2008)

### 1 Einleitung

Vor 40 Jahren wurden an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich das Gleitmikrometer und etwas später das Trivec-Messsystem entwickelt. Das Ziel von Prof. Dr. K. Kovári, damals Leiter des Instituts für Strassen- und Eisenbahnbau (ISETH), war, in Boden und Fels sowie in Bauwerksteilen Verschiebungsprofile präzise messtechnisch zu erfassen. Seither sind die Systeme in vielen Projekten erfolgreich eingesetzt worden. Vor ca. 20 Jahren wurde ergänzend dazu das Gleitdeformometer entwickelt. Im Zuge der Anwendung, speziell im Tunnelbau, wurde der hohe Stellenwert dieser Messsysteme festgestellt. Die Resultate waren ein wichtiger Teil um das Strukturverhalten Bauwerk-Baugrund zu beurteilen und dienen der Überwachung bestehender und neu erstellter Bauwerke. In den vergangenen Jahren wurden die Messausrüstungen und die Messrohre laufend weiter entwickelt, um die gestellten Messaufgaben präziser und weitreichender ausführen zu können. Die aktuelle Entwicklung dieser Messsysteme beinhaltet die Digitalisierung der Messgeräte und die Integration von Sensoren höchster Genauigkeit.

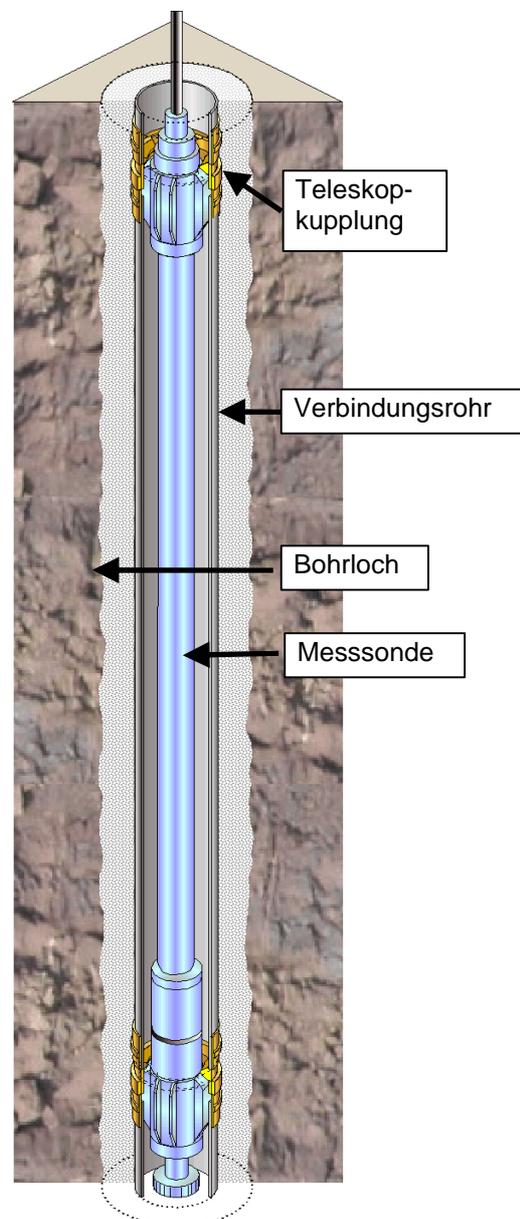


Abb. 1: Schemaskizze Sonde im Messrohr

## **2 Messausrüstung zur Ermittlung von Verschiebungsprofilen**

Um die Verschiebungen und Verformungen im Boden, Fels und in Bauwerksteilen zu ermitteln, wurde ein Messsystem entwickelt, das aus einer portablen Messausrüstung und den Messrohren besteht. Die Messrohre, welche eine Messlinie bilden, werden im Boden und Fels, meist in Bohrungen, eingebaut oder in Pfählen, Schlitzwänden oder anderen geotechnischen Bauwerksteilen installiert. Mit der Messausrüstung und den installierten Messrohren werden entlang dieser Messlinie, einer Reihe von regelmässig in 1m-Abstand angeordneten Messpunkten, die Verschiebungsprofile ermittelt. Die wesentlichen Merkmale dieses Messsystems sind:

- Die Messsysteme können für verschiedenste geotechnische Problemstellungen im Fels, Boden und in Bauwerken eingesetzt werden.
- Die Basislänge der Messsonden beträgt 1.0 m
- Die Messlinie, welche durch die Messrohre gebildet wird, weist jeden Meter Teleskopkupplungen auf. Dadurch werden die Verschiebungen praktisch zwangungsfrei mit der Messausrüstung erfasst.
- Die ermittelten Messresultate weisen eine hohe Messgenauigkeit, Reproduzierbarkeit und Langzeitzuverlässigkeit auf.
- Die portable Messausrüstung kann in mehreren Messrohren und Projekten eingesetzt und regelmässig kalibriert werden.

### **2.1 Messrohre**

Die Messrohre bestehen aus Verbindungsrohren, in der Regel aus HPVC, und aus Teleskopkupplungen im Abstand von 1.0 m. Für Gleitmikrometer- und Trivec-Messungen bestehen die Teleskopkupplungen aus Messing und für Gleitdeformeter-Messungen aus ABS-Kunststoff. Die Teleskopkupplungen weisen innen konisch geformte Präzisionsmessmarken auf. Im Moment der Messung werden die sphärisch ausgebildeten Messsondenköpfe in den konisch geformten Präzisionsmessmarken verspannt und sind so während der Messung statisch bestimmt gelagert. Dadurch werden eine hohe Messgenauigkeit und eine sehr gute Reproduzierbarkeit der Lagerung der Messsonde im Messrohr erreicht. Durch die spezielle Formgebung der Messsonden-Köpfe und der Teleskopkupplungen kann das Messrohr auf der

gesamten Länge mit der Messsonde befahren werden. Dazu wird die Messsonde mittels Messgestänge von der Messposition in die Gleitposition gedreht.

Spezielle Messrohre stehen je nach Anwendung zur Verfügung:

- Für kombinierte Messungen mit einem Bohrlochinklinometer werden Gleitmikrometer- und Gleitdeformeter-Messrohre mit innenliegenden Längsnuten installiert.
- Druckwasserdichte Messrohre werden mit doppelter O-Ring-Abdichtung gefertigt. Bei stark quellendem Gestein ist der Einsatz von Verbindungsrohren aus Stahl, unter Umständen aus rostbeständigem Stahl, zu empfehlen. Um den Kraftschluss zwischen Verbindungsrohr und Fels zu verhindern werden diese Rohre mit einer Kunststoffolie umhüllt.
- In weichen Böden, bei welchen Gleitdeformeter-Messrohre eingesetzt werden, wird die Verteilung des Messbereichs dem Ziel der Messung angepasst. Standard-Messrohre weisen eine Messbereichsverteilung von 50 mm Stauchung / 50mm Verlängerung auf. Instrumentierungen, bei denen mit Stauchungen zu rechnen ist (z.B. Konsolidationsversuche), werden mit Messrohren ausgerüstet, die für 80 mm Stauchung und 20 mm Verlängerung vorbereitet sind. Werden grosse Verlängerungen und Dehnungen erwartet, sind Messrohre für 20 mm Stauchung und 80 mm Verlängerung vorzusehen.



Abb. 2. Gleitmikrometer- Messrohre

## 2.2 Messrohrinstallation

Lösungen für verschiedenste Problemstellungen bei der Messrohrinstallation wurden erfolgreich realisiert. Diese Erfahrungen können bei der Planung und Ausführung der Installationen einbezogen werden.

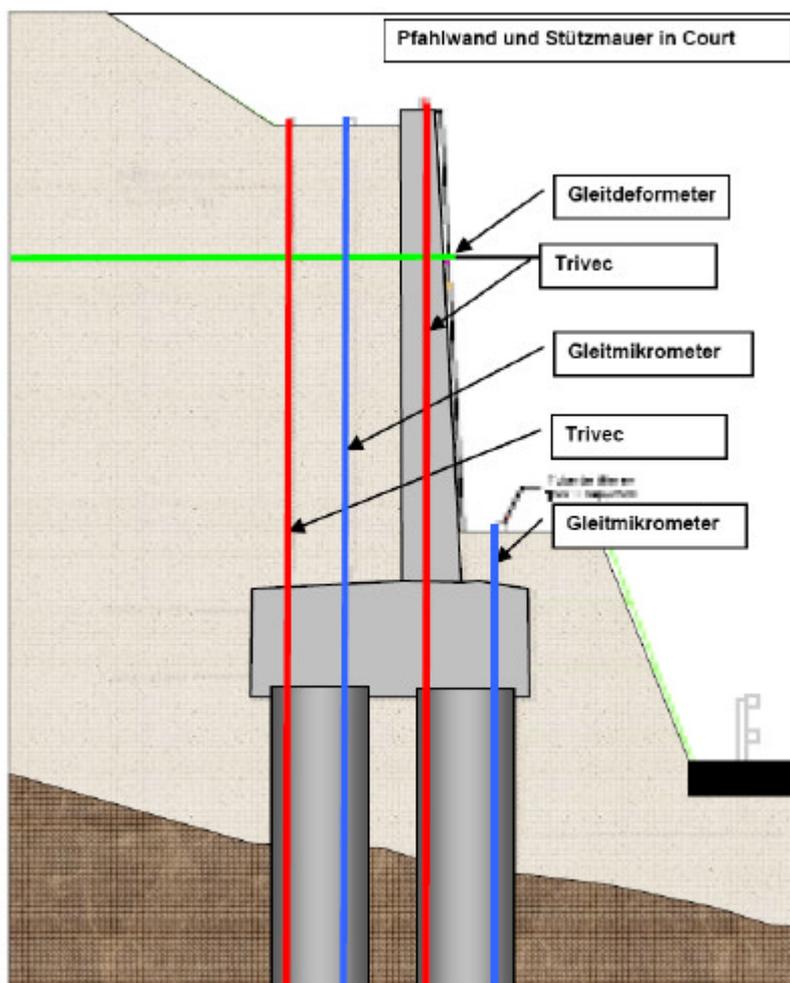
Die Messrohre werden üblicherweise in Bohrungen installiert. Der Ringraum zwischen Bohrloch und Messrohr wird mit einer Suspension auf Zementbasis verfüllt. Meist besteht die Suspension aus Wasser, Tonpulver und Zement. Das Mischungsverhältnis der einzelnen Komponenten wird dem Belastungs-Verformungsverhalten des Bodens oder dem Fels angepasst, damit die erhärtete Suspension die auftretenden Verschiebungen möglichst gut auf das Messrohr überträgt und die instrumentierte Bohrung das «natürliche» Verhalten im Boden und Fels nur minimal beeinflusst. Bei weichen Böden wird ein Zementgehalt von ca. 200 kg pro m<sup>3</sup> Suspension angestrebt. Damit diese Suspension stabil bleibt wird Ton (meist Aktivbentonit oder Opalinustonpulver) vor der Zementbeigabe zugemischt. Bei gut tragfähigem Boden und weichem Fels wird der Anteil des Zementes auf bis zu ca. 500 kg pro m<sup>3</sup> Suspension erhöht. Die Aufbereitung der Suspension und das Verfüllen in die Bohrung müssen mit geeigneten Geräten erfolgen. Der Einsatz eines motorgetriebenen Injektionsmischer und Injektionspumpe ist zu empfehlen. Die Injektion wird über Injektionsschläuche oder Injektionsgestänge in die Bohrung meist drucklos eingebracht. Bei Überdruck aus der Bohrung erfolgt die Injektion mit Hilfe von Injektionspackern. Bei der Messrohrinstallation in stark geklüftetem Fels wird entweder der Fels vor der Messrohrinstallation vorinjiziert oder ein Geotextilstrumpf verwendet, der das Messrohr umhüllt.



**Abb. 3: Messrohrinstallation in Pfählen**

In Pfählen oder Schlitzwänden wird das Messrohr oft in die Bewehrung eingelegt und zusammen mit dem Pfahl oder dem Schlitzwandelement betoniert. Um Beschädigungen des Messrohres durch den Betoniervorgang zu verhindern, werden dann üblicherweise Verbindungsrohre aus Stahl verwendet.

Eine weitere Einbauvariante besteht darin, im Pfahl oder in der Schlitzwand ein Leerrohr einzulegen. Mittels einer durch das Leerrohr verlängerten Bohrung kann das Messrohr unter dem Pfahl oder der Schlitzwand verlängert werden. Nach dem Betonieren des Pfahles oder der Schlitzwand wird das Messrohr in das Leerrohr eingebaut und einzementiert. In mehreren Projekten, bei welchen Pfahlwände in Rutschhängen mit Trivec- oder Gleitmikrometer-Messrohren instrumentiert wurden, sind die Messrohre in die oben anschließende Stützmauer verlängert worden.



**Abb. 4: Bild Messrohrverlängerung durch Pfahlwand in die Stützmauer**

In Dichtwänden und in Erdkörpern werden an die Teleskopkupplungen Metallplatten angebracht, um die Verschiebungen auf die Messrohre zu übertragen.

Die Messrohre können im Zuge der Messungen verlängert oder verkürzt werden.



**Abb. 4: Venezia, Bocca di Lido: Konsolidationsversuch;  
mit Gleitdeformeter instrumentiert**

Bei der Instrumentierung von Baugruben wird das Messrohr ab Geländeoberkante in eine Bohrung eingebaut. Im Bereich der Baugrube wird es dann mit fortschreitendem Aushub laufend gemessen und bis zur Baugrubensohle gekürzt. Danach erfolgt eine Verlängerung bis über die Bodenplatte. Speziell gefertigte Dichtflansche werden als obere Abschlüsse eingesetzt und dienen der Abdichtung gegen das unter Überdruck stehende Grundwasser. Bei Probeschüttungen ist das Messrohr üblicherweise durch den geschütteten Erdkörper laufend zu verlängern und nach Erreichen einer Teilschütthöhe laufend zu messen.

### **3 Trivec-Messungen an der Bogenstaumauer Emosson**

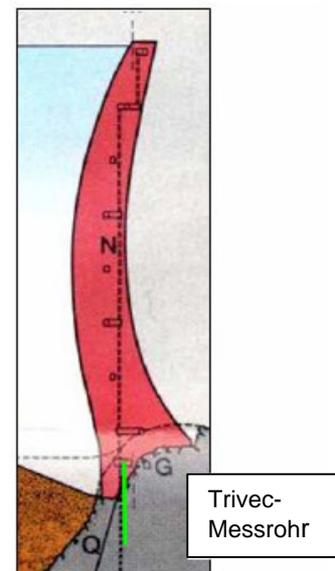
(mehr als 20 Jahre)

Die üblicherweise in Talsperren installierten Messsysteme bieten nur beschränkt Informationen zur Beurteilung des Strukturverhaltens Talsperre – Foundation. Mit Bohrlochextensometern, Loten, Fugenmessgebern und geodätisch gemessenen Punkten werden punktweise Verschiebungen in der Talsperre und im Untergrund ermittelt. Unter speziellen Umständen ist eine vertiefte Kenntnis der Verschiebungen und Verformungen im Bauwerk und im Untergrund notwendig. Die Lage von Rissen, Klüften, Scherzonen oder Zonen mit schlechteren felsmechanischen Eigenschaften

mit der Grösse und Richtung der dort auftretenden Verschiebungsvektoren soll in diesen Fällen ermittelt werden.

In mehreren Talsperren wurden in den letzten Dekaden diese Messungen sehr erfolgreich und zum Teil langjährig eingesetzt. Unter anderem werden diese Systeme in Österreich (Kölnbrein und Zillergründl), in der Schweiz (Garichte, Albigna, Zervreila, Mauvoisin, und Emosson), in Lesotho (Katsedam) sowie in Südafrika (Vaal River Dam, Rode-Elsberg Dam) eingesetzt.

In Emosson wurde zur Langzeitbeobachtung der Talsperre vom untersten Kontrollgang der 190 m hohen Bogenstaumauer Bohrungen durch die Talsperre in den anstehenden Fels erstellt und mit Trivec-Messrohren instrumentiert. Seit 1987 sind wiederholt Messungen ausgeführt worden, um die vertikalen und horizontalen Verschiebungsprofile zu ermitteln.



**Abb. 5: Bogenstaumauer Emosson**

Zu Beginn der Messkampagne wurden die Messungen alle 6 Monate, später jährlich und momentan werden sie alle 4 Jahre ausgeführt. Es ist vorgesehen, die Messungen im Zuge des Ausbauprojektes Nant de Drance mit Bau eines Zugangsstollens im möglichen Einflussbereich der Talsperre zu intensivieren.

Die Verschiebungsprofile in der vertikalen und der horizontalen Richtung (luft-/wasserseitig) sind nachfolgend dargestellt. In der Kontaktzone Beton zu Fels können in vertikaler und horizontaler Richtung vergleichsweise etwas grössere Verschiebungen beobachtet werden. Bis zur Endtiefe des Messrohres sind geringe vertikale, vermutlich elastische, Verschiebungen im Fels von ca. 0.15mm/m ermittelt

worden. In horizontaler Richtung sind luft-/ wasserseitige Verschiebungen von ca. 12.5 mm über die gesamte Messrohrlänge gemessen worden. Gut ersichtlich ist die deutliche Korrelation der Verschiebungen mit den Talsperrenwasserständen.

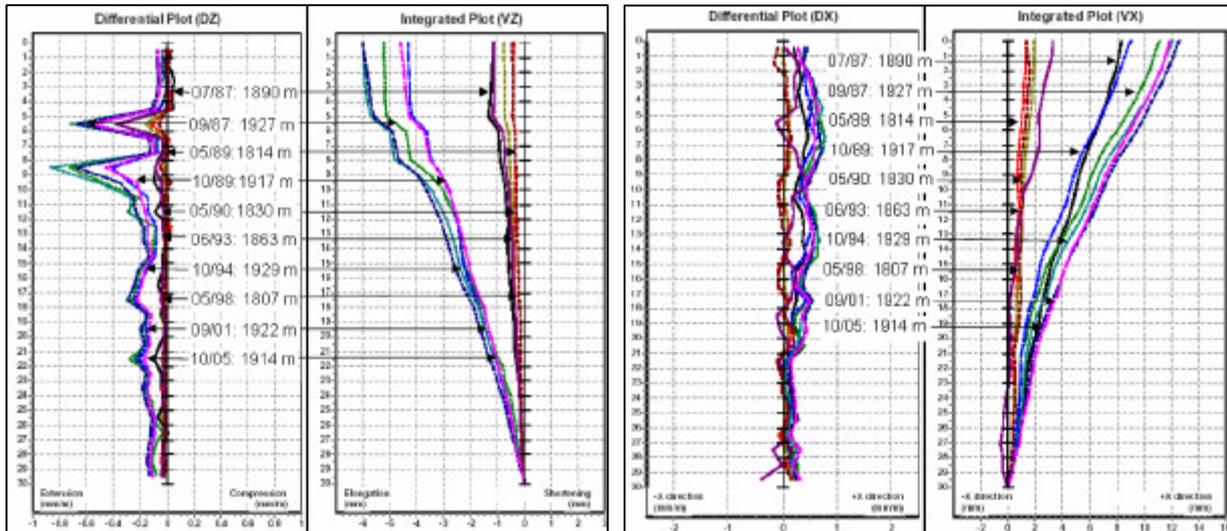


Abb. 6: Trivec-Messungen in Emosson; links: Vertikalbewegungen, rechts: Horizontalbewegungen (jede Linie stellt eine Messreihe dar)

#### 4 Zürich, Pfahllastversuche Hardturm-Fussballstadion

Die Bemessung der Pfahlfundation des zukünftigen Fussballstadions Hardturm in Zürich basiert einerseits auf Erfahrungswerten aus der Umgebung und andererseits auf statischen Pfahllastversuchen. Drei Pfahllastversuche (Pfahldurchmesser 90 cm, Pfahllängen zwischen 11 und 17 m) wurden bezüglich Lage, Tiefe und Instrumentierung dahingehend ausgelegt, möglichst gute Aussagen über die Tragfähigkeit und Lastaufnahme der verschiedenen Bodenschichten zu erzielen.

Die Schweizer-Geotechnik Norm Nr. 276/1 legt die Anforderungen an die Belastungseinrichtung, den Versuchsablauf und die auszuführenden Messungen weitgehend fest. Die Prüflast von 12 MN wurde über 12 Erdanker mittels Litzenhebern (Hubhöhe 26 cm)

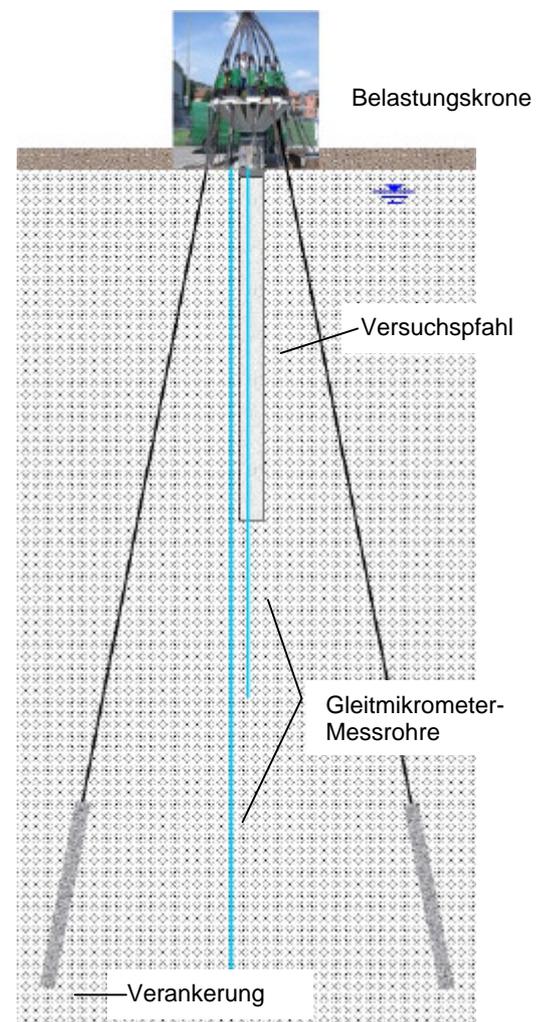


Abb. 7: Schema des Versuchaufbaus

und Flachpressen auf den Versuchspfahl aufgebracht. Neben der Steuerung und Messung der Pfahllast wurden Pfahlverkipnungen mit elektronischen Neigungsgebern ermittelt. Die Pfahlkopfsetzungen wurden mit automatisch betriebenen motorisierten Digitalnivelliergeräten gemessen. Die Daten aller Sensoren zur Pfahlkopfsetzung, Pfahlkopfverkippfung und Last wurden automatisch mit dem Solexperts GeoMonitor erfasst, per Modem fernübertragen und auf der Web-DAVIS-Projektwebseite dargestellt und so den beteiligten Ingenieuren direkt an ihrem Arbeitsplatz zur Verfügung gestellt.



**Abb. 8: Pfahlbelastungsversuch mit Gleitmikrometermessung**

Ein wesentlicher Teil der Versuchsergebnisse basierte auf der Verformungsmessung im, unter und neben dem jeweiligen Versuchspfahl. Im Pfahl wurde vor dem Betonieren ein Leerrohr eingelegt. Durch das Leerrohr wurde nach dem Betonieren eine Bohrung bis 8 m unterhalb des Pfahlfusses abgeteuft und das Messrohr auf der gesamten Länge eingebaut. Unterhalb des Pfahlfusses erfolgte die Verfüllung des Ringraumes zwischen Messrohr und Boden mit einer Wasser/Bentonit/Zement-Suspension mit vergleichsweise kleinem Zementgehalt. Im Bereich des Pfahles wurde der Ringraum mit einer Suspension mit wesentlich höherem Zementgehalt verfüllt.

Neben jedem Versuchspfahl wurde zudem in einer Distanz von 0.5 m bis 1.0 m eine Bohrung bis 40 m Tiefe erstellt und ebenfalls mit Gleitmikrometer-Messrohren instrumentiert.

Die Resultate eines Versuchspfahles sind nachfolgend als Belastungs-Zeitdiagramm und als Verschiebungsprofile dargestellt.

Die Ermittlung der Verschiebungsprofile im, unter und neben dem Pfahl mit dem hier eingesetzten Gleitmikrometer erlaubt für jede gemessene Belastung die Rückrechnung in Mantelreibung und Spitzenwiderstand. Beim Versuch bis 4MN Belastung und einer Setzung von weniger als 10 mm wirkte praktisch nur die Mantelreibung. Nach einer Erhöhung der Belastung wird vor allem der Pfahlsitzenwiderstand mobilisiert. In der numerischen Nachrechnung mit PLAXIS konnte durch eine Anpassung der Bodenkennwerte die Pfahlsetzungen und die Verschiebungen, Verformungen im und neben dem Pfahl gut abgebildet werden. Das Trag- und Setzungsverhalten kann für diesen Boden somit auch für andere Pfahldurchmesser zuverlässig abgeschätzt werden.

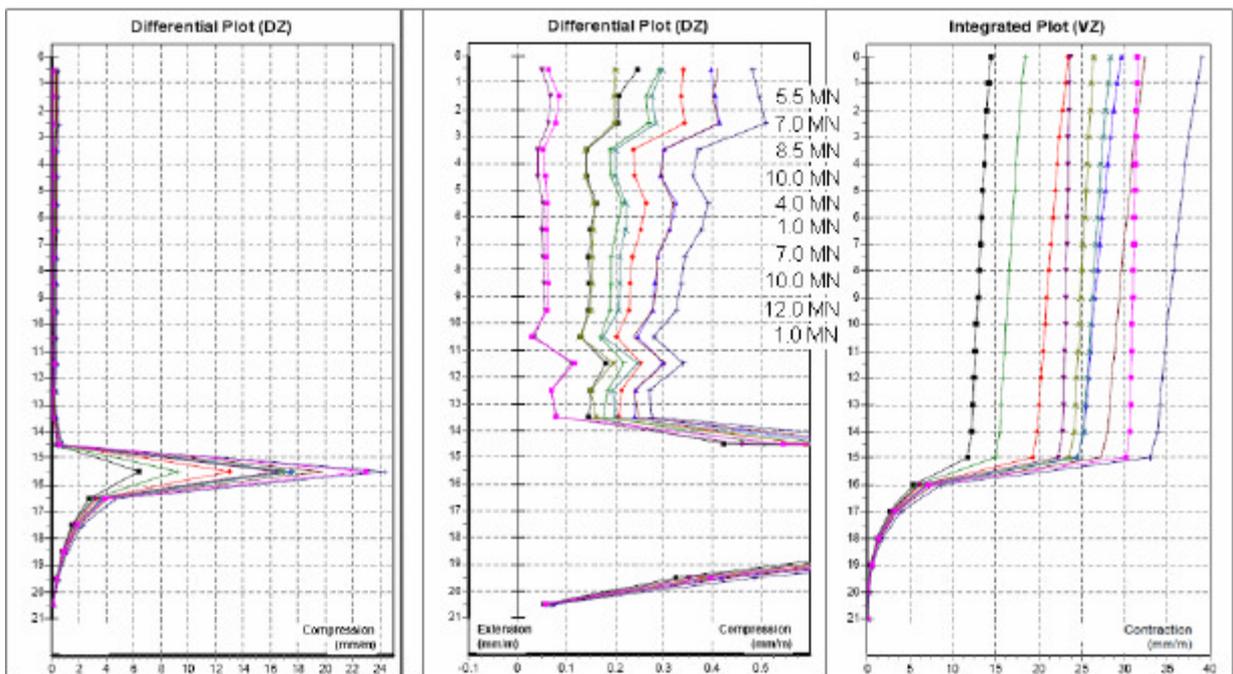


Abb. 9: Differentielle (links und in der Mitte) und integrierte Verschiebungen (rechts) im und unter dem Pfahl

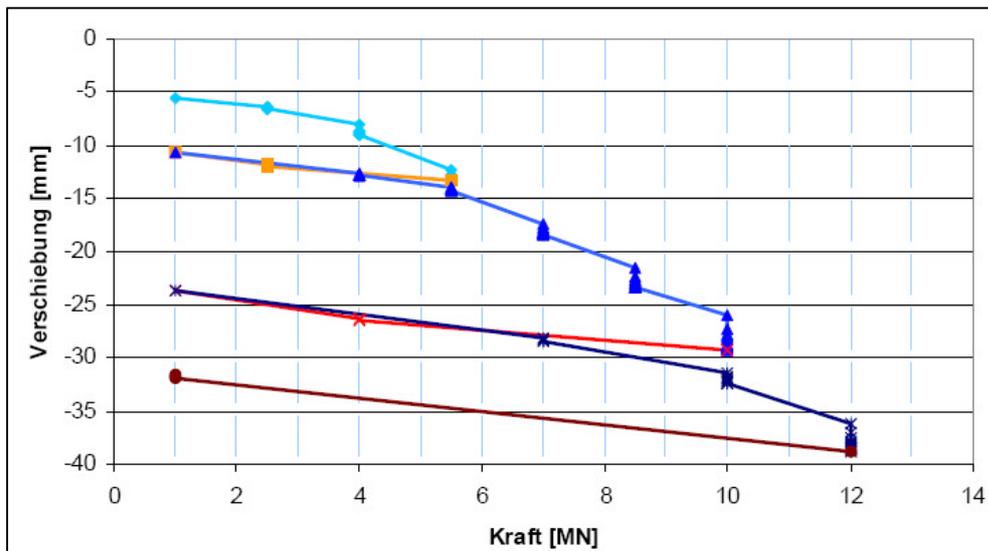


Abb. 10: Belastungs/Setzungsdiagramm

## 5 Neu entwickelte digitale Messausrüstungen

Gegenüber den analogen Messausrüstungen weisen die neu entwickelten digitalen Messgeräte wesentliche Optimierungen auf. Dies betrifft beim Gleitmikrometer und Trivec die Messgenauigkeit und die Linearität. Zudem wurde die Standardisierung der einzelnen Komponenten verbessert.

Das digitale Gleitmikrometer erfasst die messlinienaxialen Verschiebungen mit einer Genauigkeit innerhalb von  $\pm 0.002$  mm/m bei einem Messbereich  $\pm 12.5$  mm. Das Gleitmikrometer wird für Messaufgaben eingesetzt, bei welchen kleine Verschiebungen hochpräzise ermittelt werden müssen. Diese Bedingungen sind vor allem bei der Anwendung im Fels, Beton (Pfählen und Schlitzwänden) aber auch im Boden, wenn Bewegungen frühzeitig erfasst werden müssen, unabdingbar.

Mit dem digitalen Gleitdeformeter werden messlinienaxiale Verschiebungen mit einer Genauigkeit innerhalb von  $\pm 0.03$  mm/m und einem Messbereich  $\pm 50$  mm erfasst. Diese Sonde kommt vor allem im Boden und Fels zum Einsatz, wenn grössere Verschiebungen zu erwarten sind.



**Abb. 11: Messungen mit dem digitalen Trivec**

Das digitale Trivec misst messrohraxiale Verschiebungen wie das Gleitmikrometer und zusätzlich messrohrradiale Verschiebungen. Zur messrohrradialen Verschiebungsmessung ist die Trivec-Sonde mit einem biaxialen Neigungssensor mit einer Messgenauigkeit von  $\pm 0.03$  mm/m und einem Messbereich von  $\pm 10^\circ$  ab der vertikalen Lotrichtung ausgerüstet.

Die Linearität der Gleitmikrometer- und Trivec-Messausrüstung liegt innerhalb von 0.02% FS und Temperatureinflüsse auf das Messsystem werden weitgehend kompensiert. Zur Registrierung der Verschiebungen, welche durch sich verändernde Bauwerkstemperaturen verursacht sind, werden die Temperaturen zusätzlich zu den Verschiebungen laufend aufgezeichnet.

Neben der verbesserten Genauigkeit und Linearität der Messausrüstungen weisen die neu entwickelten Systeme folgende Merkmale auf:

- Digitale Signalübertragung von der Sonde. Dadurch ist das Messsignal durch sich verändernde Charakteristik des Kabels oder des Ablesegerätes unbeeinflusst.
- Das 6-adrige Messkabel mit einem Kevlarmantel und eine Kevlarseele weist ein vergleichbar kleineres Gewicht auf. Dadurch verringert sich auch das Gewicht der Kabelrolle und des Kabelhaspels.
- Für die Kabelverwahrung stehen 3 verschiedene Ausführungsvarianten (Kabel lose, Kabelrolle oder Kabelhaspel) zur Verfügung. Sie dienen der Messung aller drei digitalen Sonden und der Messung der analogen Gleitdeformersonde.
- Geringerer Stromverbrauch der Messausrüstung und damit einhergehend geringeres Gewicht des Ablesegerätes (kleine Batterien).
- Das Ablesegerät dient zur Messung aller hier aufgeführten digitalen Sonden und der Messung des analogen Gleitdeformers. Zudem können mit diesem Ablesegerät auch weitere analoge Sensoren, z. B. Wegaufnehmer mit mV/V Ausgangssignal, Druckaufnehmer mit mV/V oder 4-20mA Ausgangssignal gemessen werden.
- Zur Datenerfassung aller Sonden steht ein PDA (Personal Digital Assistant) mit einer einfach zu bedienenden Trivec-Software zur Verfügung. Die Auswertung der Messungen erfolgt nachdem die Daten auf den Büro-PC übertragen wurden mit der universell einsetzbaren Trical-Software.

## **6 Zusammenfassung**

Der Einsatz der hier beschriebenen Messsysteme in den letzten 40 Jahren, unter anderem in Talsperren, im Tunnelbau, bei tiefen Baugruben, potentiellen Rutschhängen und Felsrutschgebieten, bei Pfahllastversuchen, in Pfahlwänden, in Schlitzwänden sowie für Konsolidationsversuchen zeigt deutlich deren Bedeutung und den Stellenwert bei der Lösung verschiedenster geotechnischen Problemstellungen und der Überwachung von sicherheitsrelevanten Bauteilen. In der Zeit konnten viele Erfahrungen betreffend der Messsystemauslegung und

Einbaumethode gewonnen werden. Diese Erfahrungen gilt es für kommende Projekte einzusetzen.

Zusammen mit den neu entwickelten Komponenten des Messsystems, der Messrohre und der digitalen Messgeräte, wird der Einsatz der Messsysteme optimiert und die erzielten Messresultate werden weiter verbessert.

## **7 Literatur**

### **Heribert Frodl, Daniel Naterop**

Trivec and Sliding Micrometer: fully digital instruments for geotechnical displacement and deformation measurement, Proceedings FMGM 2007, Boston

### **Daniel Naterop, Hans J. Becker , Solexperts AG**

### **Philipp Angehrn Basler & Hofmann Ingenieure und Planer AG**

Statische Pfahlbelastungsversuche Hardturmstadion Zürich,

Beitrag Tagung 2006, Schweizerische Gesellschaft für Boden- und Felsmechanik

---

Dipl. Bauing. Daniel Naterop

daniel.naterop@solexperts.com

Solexperts AG

info@solexperts.com

Mettlenbachstrasse 25

www.solexperts.com

8617 Mönchaltorf

Tel.: +41 44 806 29 29

Schweiz

Fax +41 44 806 29 30

---