

Hydrostatische Messsysteme in der Praxis

E. Meier, H. Ingensand, M. Stalder, Ch. Brom

Zusammenfassung: Dieser Beitrag beschreibt zwei hydrostatische Messsysteme für grossräumige Deformationsmessung: Das Hydrostatic Levelling System (HLS), welches für das neue Synchrotron am Paul Scherrer Institut PSI entwickelt wurde sowie das kompakte und sehr einfach einzusetzende Large Area Settlement System (LAS), welches erstmals für die Überwachung der Bewegungen in der Staumauer Albigna zur Anwendung kam. Beide Systeme sind so empfindlich, dass durch Erdbeben bewirkte Verformungen gemessen werden können. Hohe Messempfindlichkeit der Sensoren ist allein jedoch nicht ausreichend. Ein durchdachter Aufbau des Gesamtsystems und die einfache, zuverlässige Installation sind ausschlaggebend für die Brauchbarkeit einer Messung. Systemeigenschaften wie die Möglichkeit einer fernbedienbaren Nachkalibrierung ermöglichen jederzeit die Überprüfung der spezifizierten Messgenauigkeit und deren Wiederherstellung, wenn dies erforderlich ist. Dies führt zu überprüfbar richtigen Messresultaten und steigert massgeblich die Verlässlichkeit des Messsystems. Mit der automatischen Füllstation und mit dem in jedem Sensor eingebauten Berührungspunkt ist beim PSI-HLS die Nachkalibrierung jederzeit via Internet durchführbar. Es wird gezeigt, wie wichtig die projektorientierte Einbindung einer Datenerfassung ist. Im Weiteren wird eine preisgünstige HLS Sensor Lösung mit grösserem Messbereich vorgestellt, die speziell für Anwendungen wie die in diesem Beitrag erwähnte Überwachung von dynamischen Brückenbelastungen entwickelt wurde. In dieser Anwendung ist ein effizienter Aufbau und Abbau des Systems wichtig. Deshalb wurde erstmals bei einem hydrostatischen System eine Datenübertragung via Bluetooth gewählt. Damit können die Daten vor Ort gespeichert und jederzeit berührungslos mit einem Mobiltelefon oder Smartphone ausgelesen, dargestellt und zur Archivierung oder Weiterverarbeitung an Empfänger übertragen werden.

1 Einleitung

Die Vorteile von hydrostatischen Messsystemen für die Höhenbestimmung sind vor allem in einer hohen Genauigkeit und Auflösung gegenüber anderen modernen geodätischen Instrumenten wie Digitalnivellieren und Tachymetern zu sehen. Ausserdem bieten sich hydrostatische Messsysteme aufgrund ihres robusten und einfachen Aufbaus zur ganzjährigen permanenten Überwachung durch Automatisierung der Datenerfassung und der Möglichkeit einer Fernüberwachung an.

Das grundlegende Prinzip jedes hydrostatischen Nivellements besteht darin, dass sich die frei bewegliche Wasseroberfläche immer an einer Niveaulfläche ausrichtet. Dieses Phänomen tritt ebenfalls in miteinander verbundenen Messgefässen auf und ist als Prinzip der kommunizierenden Röhren bekannt. Der Flüssigkeitshorizont dient somit als stabile Referenz für eine hochgenaue permanente Höhenmessung und stellt die Messgrundlage der hydrostatischen Systeme dar. Auf den erwähnten Grundlagen lassen sich zwei verschiedene Arten von hydrostatischen Messsystemen kategorisieren:

- Halbgefüllte Rohre, in denen sich Flüssigkeit und Luft befinden.
- Messsysteme mit vollgefüllten Rohren und einem zusätzlichen Luftdruckausgleichsschlauch, der eine Verfälschung der Messergebnisse durch den Luftdruck vermeidet.

Zu diesen zählen die klassischen Schlauchwaagen und die Differenzdruckmesssysteme, welche sich in der Art der Füllstandsmessung deutlich unterscheiden.

Zurzeit werden die Vorteile hydrostatischer Höhenmesssysteme in der hochauflösenden Beobachtung von statischen oder dynamischen Deformationen gesehen. So findet man hydrostatische Systeme bei der Überwachung von Setzungen und Neigun-

gen im Maschinenbau, bei grossen Forschungsanlagen wie Linear- und Ringbeschleunigern, bei der Überwachung von Gebäudebewegungen und Staumauern zusammen mit geotechnischen Messeinrichtungen sowie bei Hangrutschungen und Felsstürzen. Alle genannten Deformationsmessungen haben zwei wesentliche Zielaussagen:

1. Die Kontrolle von prognostizierten Verformungen
2. Die Funktion als Frühwarnsystem bei unerwarteten Bewegungen der beobachteten Objekte

Hydrostatische Höhenmesssysteme können aber nicht nur zu Langzeitüberwachungen eingesetzt werden. Sie erlauben auch, das Verhalten von Bauwerken während spezifischer Ereignisse zu erfassen wie zum Beispiel die Entlastung durch tauendes Eis, Windbelastungen oder das Befahren einer Brücke durch einen Lastwagen.

Bei Bauwerken, in denen sich wegen ihrer Gestalt ein hydrostatisches Höhenmesssystem mit einheitlichem Wasserstands-niveau nicht durchgehend einsetzen lässt, kann das System unterbrochen und vertikal versetzt weitergeführt werden. Dies erfordert jedoch eine hohe Genauigkeit der messtechnischen Erfassung, da sich Messfehler bei mehreren Versätzen kumulieren

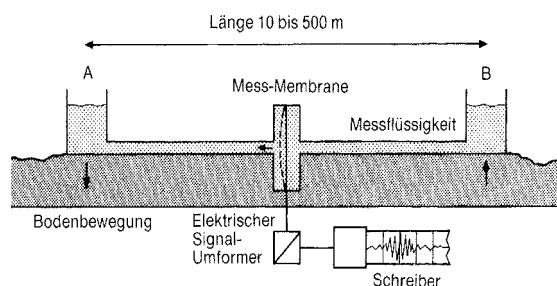


Abb. 1: Grundprinzip eines Differenzdrucksystems [Meier et al. 1998]

2 Das Large Area Settlement (LAS) Messsystem

Das LAS System basiert auf einer Druckunterschiedsmessung und stellt somit eine Weiterentwicklung des von Horsfall [1977] an der Universität Cambridge (GB) erstmals entwickelten hochgenauen Differenzdruckinstruments dar. Nach dem Anheben oder Absenken eines Messgefäßes wirkt ein Druckunterschied zwischen zwei Wassersäulen auf eine Messmembran, welche sich entsprechend durchbiegt. Die Auslenkung wird kapazitiv erfasst und in ein Stromsignal umgewandelt, das zur Höhendifferenz proportional ist (Abb. 1).

Auf der Basis dieses Prinzips wurde ein völlig neues Messsystem entwickelt, welches auf die Bedürfnisse von Überwachungsaufgaben zugeschnitten ist. Ebenso sollen mit dieser Neuentwicklung die bei hydrostatischen Systemen auftretenden Fehler wie Temperatureinflüsse, Driften des Sensors und andere Einflüsse eliminiert bzw. reduziert werden. Das neu entwickelte Mehrstellen-LAS löst die Probleme über einen mechanischen Schalter, der sich in der Zentraleinheit befindet. Über ihn können durch „Umpolung“ der Flüssigkeitssäulen und „Nullung“ des Sensors die Gerätedrift und Temperaturdriften periodisch erfasst und in einem Kalibrierzyklus automatisch korrigiert werden. Ab-

bildung 3 zeigt die Zustände des Flüssigkeitsschalters für die Normal-, Null- und Inversmessung, welche für den Mess- und Kalibrierzyklus verwendet werden. Durch die Umschaltmöglichkeit lässt sich das System ausserdem zu einem Mehrstellen-Messsystem erweitern.

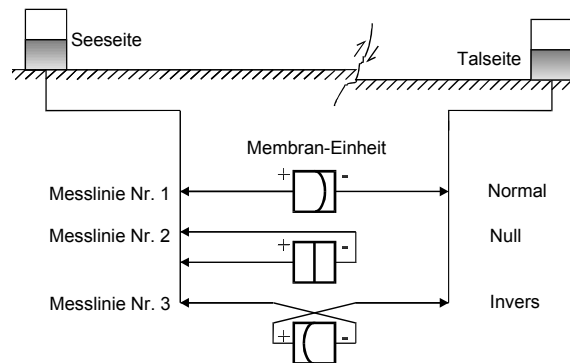


Abb. 2: Kalibrier - und Messzyklus des LAS

Ein solches Mehrstellen-Messsystem wurde speziell für die permanente Erfassung von Hangrutschungen unterhalb des Basler Münsters entwickelt und stand von 1997-1999 im Einsatz. Bei dieser Messanlage waren 10 Messstellen zur Erfassung der Hangrutschung installiert. Dabei dienten die Messdosen A und J als feste Referenz gegenüber den auf dem Rutschgebiet angebrachten Messdosen B, C, D, E, F, G, H und I.

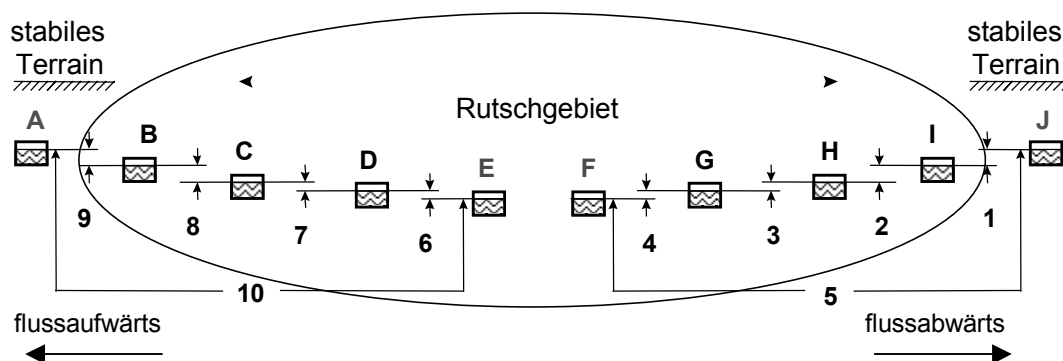


Abb. 3: Messkonzept für den Basler Münsterhügel

Eine weitere in mehreren Experimenten erprobte Anwendung des LAS ist die Bestimmung von Bodenkompressionen durch bodenbearbeitende Maschinen [Tobias et al., 2001].

3 Das Hydrostatic Levelling System (HLS)

Für die Überwachung des neu errichteten Speicherringes der Synchrotron Lichtquelle Schweiz (SLS) am Paul Scherrer In-

stitut (PSI) wurde ein Messsystem mit folgenden Spezifikationen gebaut: Messbereich 14 mm, Auflösung 0.0005 mm und eine Genauigkeit von besser als 0.01 mm. Der Speicherring (Abbildung 4) ist in 12 Sektoren unterteilt, in denen sich jeweils 4 sogenannte Girder befinden, welche die Beschleunigermagnete tragen. Jeder einzelne Girder wird von vier HLS-Sensoren messtechnisch überwacht. Gesamthaft sind 192 HLS Sensoren auf 48 Girdern installiert.



Abb. 4: Speicherring im SLS, Ansicht mit geöffnetem Dach

Das HLS-System arbeitet mit Sensoren, welche über ein halbgefülltes Rohr miteinander verbunden sind. Der Füllstand wird in den Sensoren kapazitiv über eine Elek-

trode erfasst, wobei der Kondensator durch die Wasseroberfläche und die Sensorplatte gebildet wird. Abbildung 5 zeigt den Querschnitt eines HLS-Sensors.

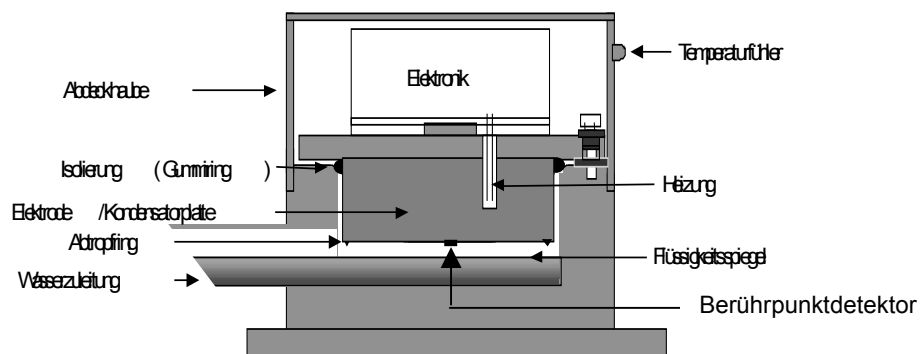


Abb. 5: HLS Sensorquerschnitt [Ingensand, 2001]



Abb. 6: HLS-Sensoren im eingebauten Zustand

Der untere Teil ist gegenüber dem oberen Teil der Einrichtung, in dem die Sensorplatte integriert und die Elektronik angebracht ist, elektrisch isoliert (siehe Abbildungen 5 und 7). Abbildung 6 zeigt einen Sensor im eingebauten Zustand. Da durch Kondenswasserbildung an der Sensorplatte eine weitere Veränderung der Kapazität entsteht, wird dieser Einfluss durch gezieltes Heizen des Elektrodenkörpers vermieden. Bei Berührung der Elektrode mit dem Flüssigkeitsspiegel sorgt ein Ablaufring für das vollständige Abtropfen des Wassers. Die Berührung des Flüssigkeitsspiegels mit dem Berührungspunkt kann durch die automatische Füllstation gezielt herbeigeführt werden (siehe Abbildung 8). Der Berührungspunkt hat einen festen Abstand von der Elektrode. Mit dem Berührungspunkt-detektor kann der Nullpunkt des Sensors bei Bedarf während dem Betrieb der Anlage erneut geeicht werden. Die Füllstation hat zudem die Aufgabe, den Wasserverlust, der durch Verdunstung entsteht, wieder auszugleichen. Diese Füllprozedur ist beim PSI-HLS vollständig automatisiert und kann über das Internet gesteuert werden.



Abb. 7: HLS-Sensoren im zerlegten Zustand



Abb. 8: Die automatische Befüllanlage im Innern des Speicherrings

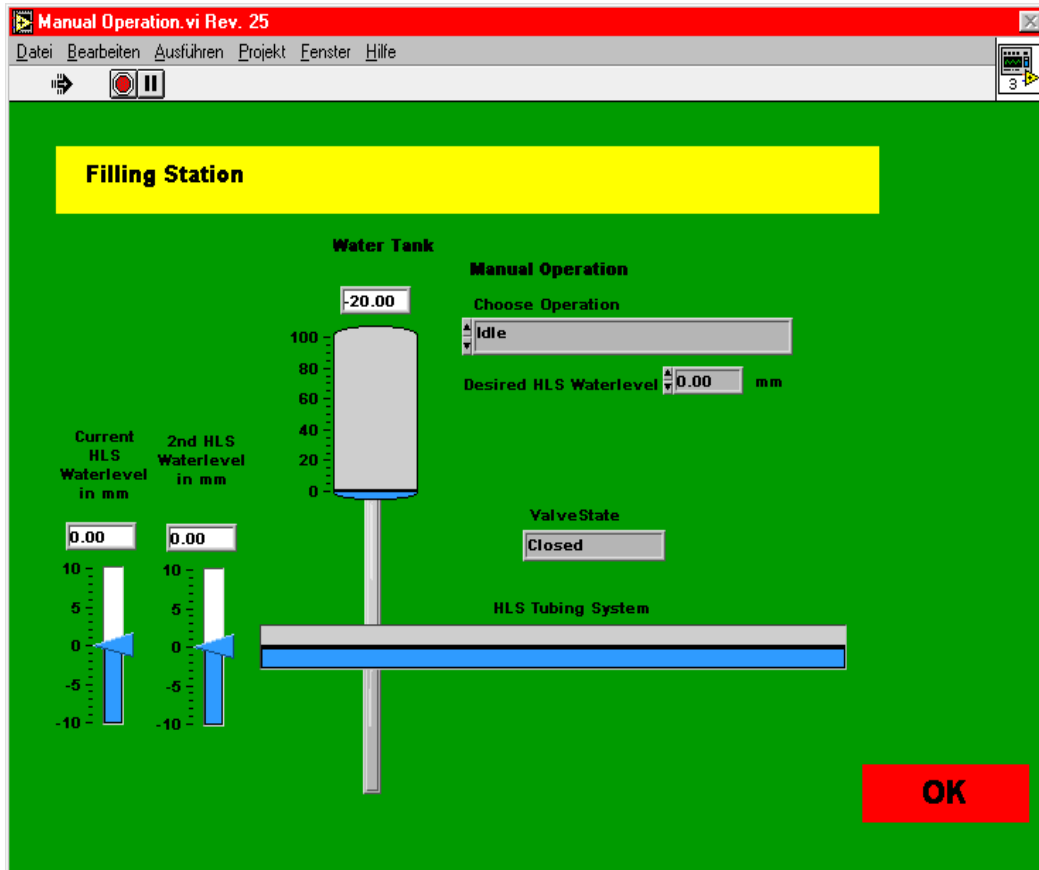


Abb. 9: Bedienoberfläche für die automatische Befüllanlage

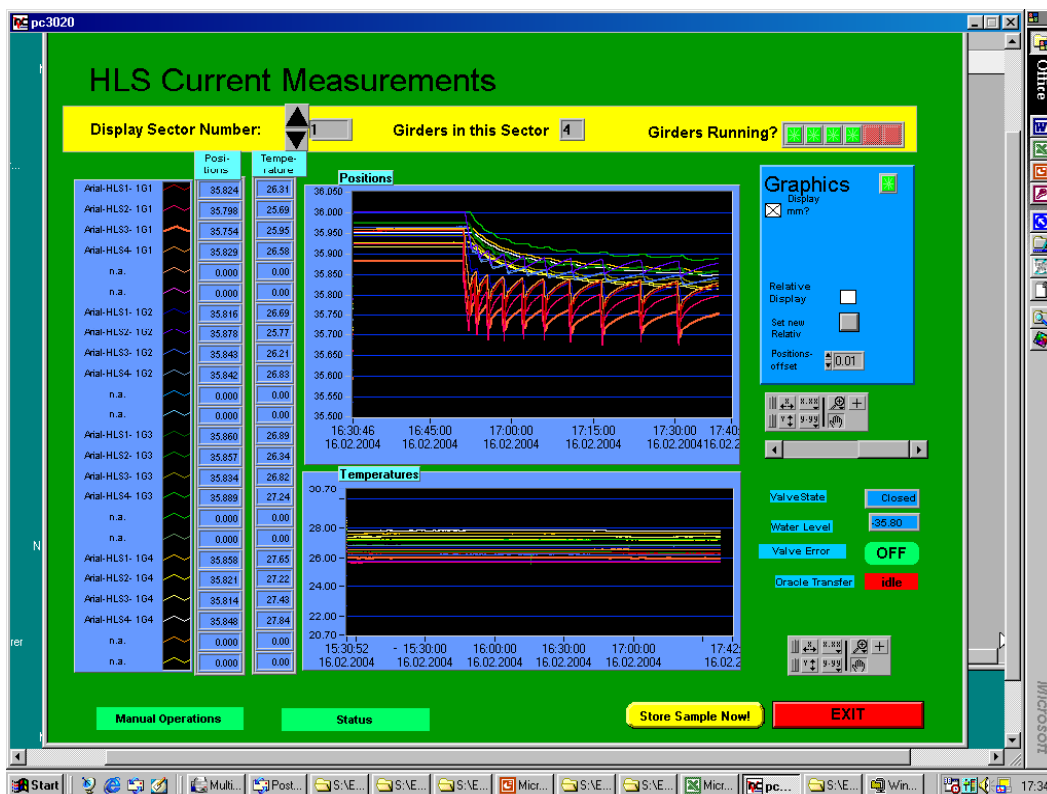


Abb. 10: Fernüberwachungs-Bedienoberfläche des via Internet steuerbaren Füllprozesses

SLS Hydrostatic Levelling System : Sector 9

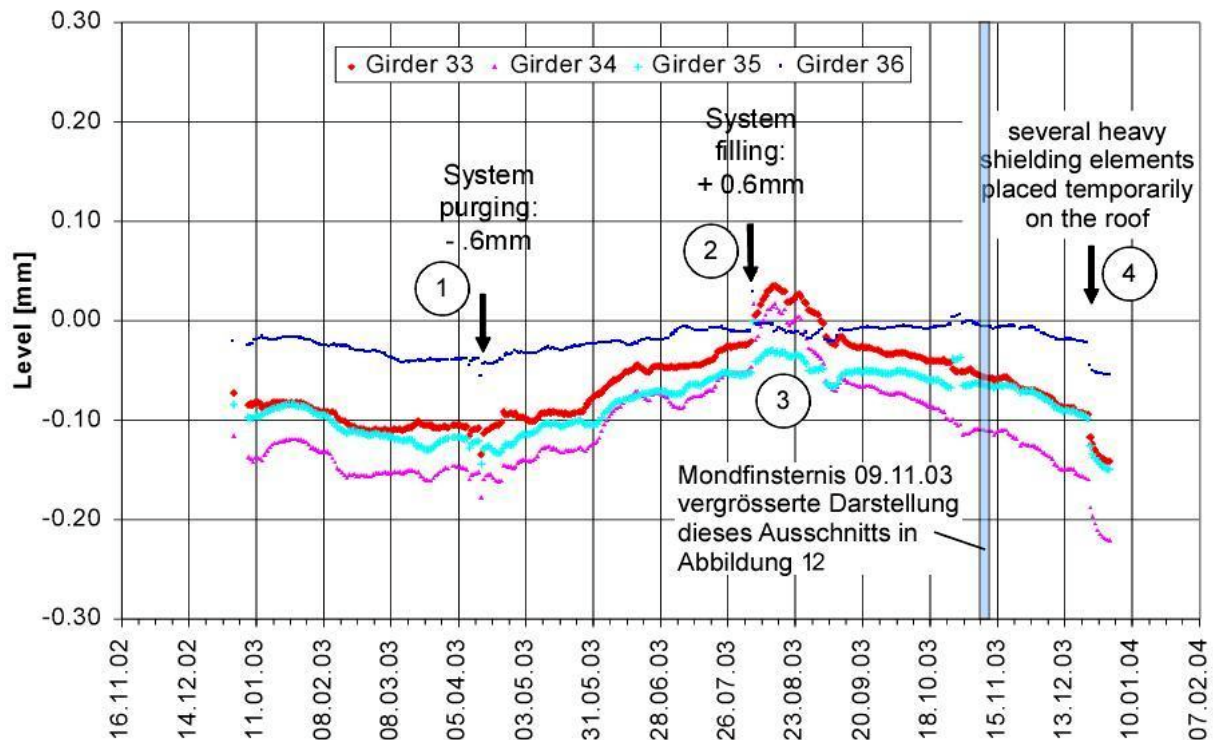


Abb. 11: Langzeitmessung im PSI. Das Beispiel zeigt den Sektor 9, bei dem die grössten Bewegungen des Untergrunds festgestellt wurden [Wey et al. 2004].

Legende zu Abbildung 11:

Systemoperationen

1 Systementleerung um -0.6 mm

2 Systemfüllung um +0.6mm

Aeussere Einflüsse

3 Die Bewegungen der 4 Girder im Sektor 9 widerspiegeln den Jahrhundertssommer 2003. Girder 36 weist minimale Veränderungen auf, alle anderen Girder zeigen hingegen klare Bodenbewegungen. Die Ursache liegt bei den Kühlleitungen, die an diesem Ort ins SLS-Gebäude führen. In diesem Sommer reichte das üblicherweise aus dem nahe gelegenen Fluss Aare bezogene Kühlwasser nicht aus, um die Temperatur im Speicherring konstant zu halten. Deshalb musste die Betriebstemperatur im Gebäude um mehrere Grade erhöht werden.

4 In der Revisionsperiode am Jahresende wurden Betonblöcke umgelagert. Die auf dem Dach des Speicherrings zwischengelagerten schweren Betonblöcke führten wegen der Lastenveränderungen, zu markanten Bodenbewegungen.

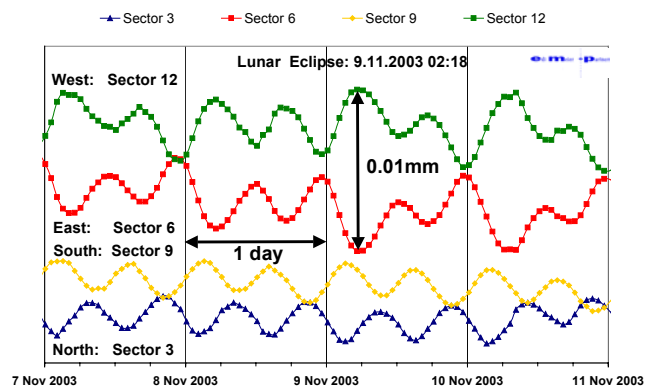


Abb. 12: Ausschnitt von 4 Tagen Dauer aus Abb. 11. In der höheren zeitlichen Auflösung dieser Grafik ist die Verformung des Messobjekts erkennbar, wie sie unter dem Einfluss der Gravitationskräfte während einer Mondfinsternis entsteht.

Datenübermittlung

Die analog gemessenen Daten werden durch einen A/D Wandler digitalisiert und anschliessend weitergeleitet. Die Datenübertragung hängt stark von der Aufgabenstellung der Überwachung ab. Für fest installierte Systeme, wie das im SLS eingebaute HLS-PSI, wird ein CAN-OPEN Bus verwendet. Da durch die grosse Zahl von Sensoren sehr viele Daten übertragen werden müssen, hat dieser Bus deutliche Vorteile gegenüber dem häufig verwendeten, deutlich langsameren RS485 Bus. Für den raschen Feldeinsatz bieten Stand-Alone Lösungen mit drahtloser Datenübertragung und Batterie gestützter Stromversorgung eine Vielzahl von zusätzlichen Anwendungsmöglichkeiten. Zudem ergibt sich eine deutliche Zeitersparnis bei der Installation des Systems wie auch bei der Datengewinnung.

5 Datenverarbeitung

Für eine erfolgreiche Messkampagne sind die Genauigkeit des verwendeten Messgerätes und eine fachgerechte Installation nicht ausreichend. Diese Voraussetzungen sind wichtig für zuverlässige Daten, ebenso wichtig ist aber auch die Sicherstellung einer kontinuierlichen Datenerfassung, die Übertragung und Auswertung. Das Problem liegt dabei vor allem in der grossen Datenmenge, die abhängig von der Anzahl Sensoren, der Abtastfrequenz und der Zeitspanne der Messung aufgezeichnet werden. Dies stellt hohe Anforderungen an das Datenmanagement und die Software, welche ermöglichen muss, die gemessenen Daten übersichtlich zu visualisieren, um die für die Aufgabenstellung relevanten Daten zu erkennen. Ein weiterer Anspruch ist auch der Export der Daten in Plattform übergreifenden Formaten, um zusätzliche Analysen der Daten zu ermöglichen.

6 Weitbereichs-HLS System PWR mit Bluetooth-Datenübertragung



Abb. 13: Precision Wide Range-HLS-System PWR

Abbildung 13 zeigt das neue Precision Wide Range HLS-System PWR, welches für die dynamische Brückenüberwachung entwickelt wurde. Das Mess-Prinzip wurde vom PSI Levelsensor übernommen. Der Messbereich wurde so erweitert, dass 54mm Standardrohre verwendet werden können. Die Digitalisierung und Speicherung der Daten erfolgt lokal bei jedem Levelsensor. Ausgelesen werden die Daten berührungslos via Mobiltelefon mit Bluetooth Technologie.

Dadurch fällt nicht nur die aufwändige Verkabelung im Feld weg, sondern auch die Gefahr von Zerstörung durch Überspannungen, die im Sommer oft infolge lokaler Gewitter ganze Messnetze lahm legen können.

Die Qualität der ausgelesenen Daten kann auf dem Display des Mobiltelefons in Form einer Liniengrafik direkt vor Ort beurteilt und anschliessend zur Zentralstelle übermittelt werden. Diese Technologie eröffnet neue Wege, mit denen die Effizienz in der Bauwerksüberwachung markant gesteigert werden kann.

Referenzen

INGENSAND, H., MEIER, E. (2001): Neuere Entwicklungen von hydrostatischen Messsystemen für permanente Überwachungsmessung. 11. Internationale Geodätische Woche, 18.-24.2.2001, Oberrugl, in Proceedings des Instituts für Geodäsie, Innsbruck: Institutsmittelungen Heft 19, 191-194.

TOBIAS, S., HENNES, M., MEIER, E., SCHULIN, R. (2001): Estimating soil resilience to compaction by measuring changes in surface and subsurface levels. Soil Use and Management, 17, 229-234.

RIVKIN, L. (2000) Paul Scherrer Institut PSI, Scientific Report 1999 / Volume VII,

Swiss Light Source, ISSN 1423-7369, March 2000, 13-15.

MEIER, E., HUGGENBERGER, P., INGENSAND, H. (1998): Precision monitoring of displacement over large areas, Hydropower & Dams, Issue Six, p. 77-80.

HORSFALL, J.A.C. (1977): A new geophysical tiltmeter. Nature, 274, pg.675-676.

WEI, F.Q., MEIER, E., RIVKIN, L., WRULICH, A., (2004) Paul Scherrer Institut PSI, Scientific Report 2003 / Volume VII, Swiss Light Source, ISSN 1423-7369, March 2004, 26-27.

Anschriften:

Edi Meier + Partner AG
Technopark Winterthur
Jägerstrasse 2
CH-8406 Winterthur, Schweiz
Tel ++41-(0) 52 222 82 72
Fax ++41-(0) 52 222 01 83

info@emp-winterthur.ch
www.emp-winterthur.ch

Prof. Dr. Hilmar Ingensand
Institut für Geodäsie und Photogrammetrie
ETH Zürich
CH-8093 Zürich, Schweiz

Tel ++41-(0) 1 633 30 56
Fax ++41-(0) 1 633 11 01

ingensand@geod.baug.ethz.ch
www.geometh.ethz.ch

Prof. Charles Brom
Institut für Mechatronische Systeme
Zürcher Hochschule Winterthur
CH-8401 Winterthur, Schweiz

Tel ++41-(0) 52 267 77 80
Fax ++41-(0) 52 267 77 81

charles.brom@zhwin.ch
www.ims.zhwin.ch

Martin Stalder
Institut für Mechatronische Systeme
Zürcher Hochschule Winterthur
CH-8401 Winterthur, Schweiz

Tel ++41-(0) 52 267 78 34
Fax ++41-(0) 52 267 77 81

martin.stalder@zhwin.ch
www.ims.zhwin.ch