

Ingenieurvermessung 2004

14th International Conference on Engineering Surveying Zürich, 15. – 19. März
2004

Tutorial

Hydrostatische Technologien

16. März 2004

Maja Haberecht, ETH Zürich



ETH
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich



Technische Universität Graz
Institut für Ingenieurgeodäsie
und Messsysteme

1 Einleitung

Der freie Flüssigkeitshorizont dient bereits seit mehreren tausenden Jahren als horizontale Referenz. Auf dieser physikalischen Grundlage entwickelte sich das Prinzip der kommunizierenden Röhren, welches wiederum die Basis von jedem Schlauchwaagensystem darstellt. Nachdem das hydrostatische Nivellement als ältestes Messgerät in Vergessenheit geraten ist, wird es heute wieder vermehrt eingesetzt. Gründe hierfür sind in dem hydrostatischen Prinzip selbst sowie in den daraus abgeleiteten Eigenschaften wie der hohen Genauigkeit, dem nicht erforderlichen Sichtkontakt, der Eignung der Systeme zur Automatisierung und ihrer Robustheit zu finden. Obgleich alle hydrostatischen Messsysteme auf dem Prinzip der kommunizierenden Röhren basieren, existieren die verschiedensten Bauarten, wodurch diese Systeme wiederum sehr vielseitig einsetzbar sind. Dieser Beitrag gibt einen Überblick über hydrostatische Systeme, ihre Vielfalt und damit auch ihrer Einsatzmöglichkeiten.

2 Aktualität hydrostatischer Messsysteme

„Die Schlauchwaage als ältestes bekanntes Messgerät in der Geschichte der Baumesstechnik erfährt in der heutigen Zeit ein unaufhaltbares Comeback.“¹

Die Bestimmung von Höhenänderungen bei der Überwachung von Ingenieuranlagen, Bauwerken, Hangrutschungen, Bodenkompressionen sowie geotektonischen Bewegungen erlangen eine zunehmende Bedeutung im Rahmen von ingenieurgeodätischen Anwendungen und des so genannten Geomonitoring [Möser et al., 2000]. Die Vorteile hydrostatischer Messsysteme für die Höhenbestimmung sind vor allem in einer hohen Genauigkeit und Auflösung gegenüber anderen modernen geodätischen Instrumenten wie Digitalnivellieren und Tachymetern und damit in der hochauflösenden Beobachtung von statischen oder dynamischen Deformationen zu sehen. Typische Aufgabenfelder stellen folgende Anwendungen dar:

- Überwachung von Setzungen und Neigungen im Maschinenbau, [fpm, 2001]
- bei Brückenkonstruktionen/ Historischen Bauten, [Tresp, 2000; Dames, Jakobs, 2002; Kuhn, 1998],
- bei der Überwachung von Gebäudebewegungen und Staumauern zusammen mit geotechnischen Messeinrichtungen [Meier, Ingensand, 1996] sowie bei
- Hangrutschungen und Felsstürzen.

Neue Anwendungsgebiete erschlossen sich aus den prägnanten Eigenschaften des hydrostatischen Prinzips: der hohen erreichbaren Genauigkeit und dem nicht erforderlichen Sichtkontakt zwischen den einzelnen Messstellen. Durch die gezielte Verbesserung bestehender Konzepte konnten sich einerseits hochgenaue hydrostatische Systeme unterschiedlichster Bauform für Beschleunigeranlagen etablieren und andererseits ein Messsystem für die Erfassung von Bodenkompressionen entwickelt werden.

Dabei wird es in Abhängigkeit von der Aufgabenstellung und den Umgebungsbedingungen notwendig sein, die verschiedenen hydrostatischen Messmethoden gegeneinander abzuwägen. Alle Verfahren besitzen durch Neuentwicklungen bezüglich Sensorik, Automatisierung der Datenerfassung und -kommunikation das Potential, als permanente autonome Messeinrichtungen zum Einsatz zu kommen. Aufgrund ihres robusten und einfachen Aufbaus eignen sie sich zusätzlich zur ganzjährigen Überwachung von Deformationen. Jedes Monitoring besitzt zwei wesentliche Ziele: die Kontrolle von

¹ [Glötzl, 2003]

prognostizierten Verformungen und die Funktion als Frühwarnsystem bei unerwarteten Bewegungen der beobachteten Objekte.

Unter den sich stets ändernden und steigenden Anforderungen an die Schlauchwaagensysteme und der stetigen Sensorentwicklung kristallisierten sich verschieden hydrostatische Messprinzipien heraus. Hydrostatische Systeme werden in zwei Hauptgruppen gegliedert:

- die Drucksysteme und
- die Schlauchwaagensysteme.

Die Funktionsweise der Schlauchwaagen basiert auf der Messung des Flüssigkeitspegels. Drucksysteme hingegen bestimmen den hydrostatischen Druck der anliegenden Flüssigkeitssäulen. Die messtechnische Erfassung dieser physikalischen Größen ist abhängig vom verwendeten Sensor. Die Wahl der Sensoren wird wiederum beeinflusst von der geforderten Genauigkeit und den äusseren Rahmenbedingungen. Abbildung 1 stellt eine Möglichkeit der Gliederung hydrostatischer Systeme dar.

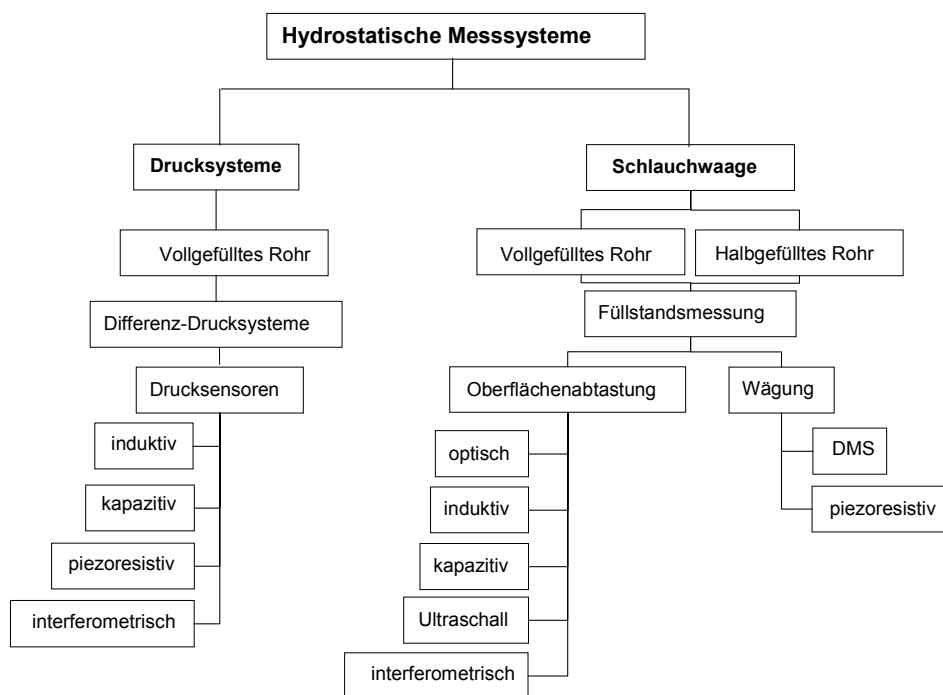


Abbildung 1: Übersicht hydrostatischer Systeme

Die Unterteilung wurde nach der zu bestimmenden physikalischen Grösse, den anliegenden hydrostatischen Druck oder dem Füllstand in den Steiggefässen, gewählt. Später werden beide Messmethoden erläutert sowie die einzelnen Abtastverfahren hinsichtlich ihrer Genauigkeit verglichen. Bei den Schlauchwaagensystemen (Bestimmung des Füllstandes) gibt es eine weitere Möglichkeit der Unterscheidung nach halbgefüllten und vollgefüllten Rohren. Die Erfassung der Flüssigkeitsoberfläche kann bei beiden Arten durch die gleichen Abtastverfahren erfolgen.

3 Das hydrostatische Prinzip

Der grundlegende Gedanke eines jeden hydrostatischen Nivellements ist, dass sich die frei bewegliche Wasseroberfläche an einer Äquipotentialfläche ausrichtet. Dieses Phänomen tritt ebenfalls in miteinander verbundenen Messgefäßen auf. Dieses für hydrostatische Systeme grundlegende Prinzip der kommunizierenden Röhren dient als stabile Referenz für eine hochgenaue permanente Höhenmessung [Ingensand, Haberecht, 2002].

3.1 Schlauchwaagen

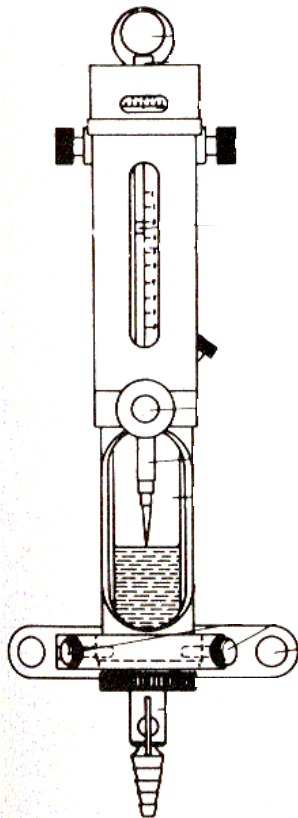


Abbildung 2: Darstellung der Freiberger Schlauchwaage (vollgefüllt).

Bei Schlauchwaagensystemen wird der Füllstand der Flüssigkeitsoberfläche durch verschiedene Abtastverfahren bestimmt. Es existieren zwei grundsätzlich verschiedene Ausführungen von Schlauchwaagen:

- halbgefülltes oder
- vollgefülltes Rohr.

Zu einem einfachen Schlauchwaagensystem gehören immer mindestens zwei Messgefäße (Steigrohre, siehe Abbildung 2), welche durch einen Flüssigkeitsschlauch miteinander verbunden sind, ein Luftdruckausgleichsschlauch, eine Horizontiervorrichtung und ein Sensor zur Abtastung der Oberfläche. Die gesuchte Höhenänderung ergibt sich aus der Differenz der gemessenen Pegelstände in den Steigrohren.

$$\Delta h = h_1 - h_2$$

Die Bewegung einer Messstelle in einem Mehrstellen-system kann durch den Vergleich der Pegelstände lokalisiert werden. In dem bewegten Messgefäß beträgt die Füllstandsänderung den (n-1) fachen Wert gegenüber den unbewegten Messstellen [Busch, 1980].

$$\Delta h_{bew} = \frac{n-1}{n} \cdot \Delta h$$

$$\Delta h_{unbew} = \frac{-1}{n} \cdot \Delta h$$

Die Abtastverfahren für die Bestimmung der Flüssigkeitsoberfläche können in „berührend“ und „berührungslos“ klassifiziert werden [Brunn et al.,2001]. Wobei die berührungslos messenden Verfahren/ Sensoren eine höhere Genauigkeit erreichen als die hier aufgeführten berührend messenden Methoden. So setzt man heute hauptsächlich Sensoren ein, welche berührungslos die Änderungen der Füllstände bestimmen.

berührend	berührungslos
Messspitze	kapazitiv
Kontaktstifte	wiegen
Schwimmer	akustisch
	optisch

Für unverfälschte Messungen wird vorausgesetzt, dass die Flüssigkeitsoberflächen und somit die Referenz, in allen miteinander verbunden Messzylindern auf einer Äquipotentialfläche liegen. Daher ist es notwendig, dass sich Druckunterschiede z.B. über einen Luftdruckausgleichsschlauch kompensieren können. Ebenfalls sollten Temperaturschwankungen in den Steigrohren, welche Dichteänderungen der Flüssigkeit bewirken und somit Änderung der Pegelhöhe induzieren, an allen Messstellen konstant sein, respektive mitbestimmt werden. Einerseits kann dies über eine zur Höhenbestimmung simultane Temperaturmessung oder durch die gleichzeitige Erfassung einer Referenzhöhe im Messgefäß geschehen. Bei halbgefüllten Schlauchwaagen-systemen, wird der vertikale Temperaturgradient konstruktiv eliminiert, indem die Flüssigkeitsoberflächen jeder Messstelle immer auf demselben Höhenniveau liegen. Daher sind diese Systeme besonders für Höhenüberwachungsmessungen in einem instabilen Temperaturfeld geeignet. Eine weitere Eigenschaft von Schlauchwaagen-systemen ist das Ausbreitungsverhalten von Oberflächenwellen. Bewegungen der Flüssigkeitsoberfläche können durch verschiedene äussere Einflüsse verursacht werden und führen zur Vortäuschung von nicht existierenden Bewegungen. Das Ausbreitungsverhalten und die Einschwingzeit sind von mehreren Faktoren abhängig. Den grössten Einfluss (bei gleich viskosen Flüssigkeiten) hat, neben Faktoren wie Frequenz und Amplitude einer Störung, der Rohrdurchmesser. Bedingt wird dies durch die Adhäsionskräfte zwischen Rohr-/ Gefässwand und der Flüssigkeit selbst. Aufgrund von diesem Sachverhalt muss die Einschwingzeit bei Schlauchwaagensystemen beachtet werden.

3.2 Drucksysteme

In der Ingenieurgeodäsie werden bei Überwachung von Deformationen von Staumauer- oder Bodenbewegungen hauptsächlich Differenzdrucksysteme angewendet. Das Funktionsprinzip der Differenzdruckmessung besteht darin, dass eine Membran die horizontale Flüssigkeitssäule unterbricht. Die Auslenkung der Messmembran ist abhängig vom anliegenden hydrostatischen Druck und kann mit unterschiedlichen Umformungsverfahren abgegriffen werden. Das Ausgangssignal ist je nach Sensor ein Spannungs- oder Stromwert (Abbildung 3). Die differenzdruckabhängige Änderung dieses Signals ist proportional zu dem zu bestimmenden Höhenunterschied des Messdosenpaares.

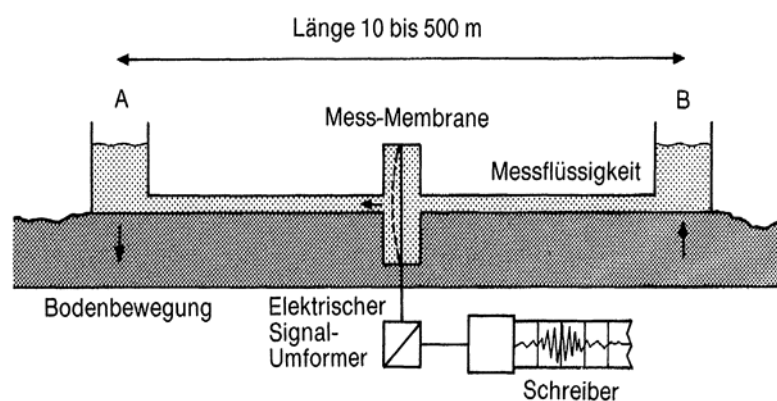


Abbildung 3: Prinzip eines hydrostatischen Differenzdrucksystems [Meier et al., 1998].

Aufgrund der Messmembran, welche einen Flüssigkeitsaustausch zwischen den Messstellen verhindert, spricht man bei Drucksystemen von tatsächlich statischen Systemen. Die Rückstellkraft der Membran verkürzt die Einschwingzeit beachtlich, wodurch die Beobachtung dynamischer Bewegungen, wie z. B. die Schwingungen einer Brückenkonstruktion, realisiert werden kann. Ein weiterer Vorteil von Drucksystemen ist

die Temperaturunempfindlichkeit gegenüber kleinen, homogenen Änderungen. Dies führt zu einer erhöhten Systemgenauigkeit.

Ein Differenzdrucksensor im Niederdruckbereich, zum Beispiel mit einer Messspanne von 0-10 mbar, dies entspricht einer Höhe von 100 mm, besitzt eine maximale Auflösung von 0,1 mbar und kann somit eine Höhenänderung von 1 mm erfassen. Die Auswahl eines geeigneten Sensors richtet sich einerseits nach der geforderten Genauigkeit und andererseits nach dem notwendigen Messbereich. Die Genauigkeit und der Messbereich der Sensoren verhalten sich umgekehrt proportional zueinander.

4 Genauigkeitsbetrachtung

4.1 Systemgenauigkeit

Für die Schlauchwaagensysteme, mit halbgefülltem sowie auch vollgefülltem Rohr gibt es Abtastverfahren der Flüssigkeitsoberflächen, welche den Genauigkeitsbereich von 1 µm erreichen können. Hierzu gehören die optischen (Interferometer, OPS), die kapazitiven sowie die akustischen (Ultraschall) Verfahren. Hingegen verwenden Differenzdrucksysteme eine mechanische Abtastung des anliegenden Druckes. Bei diesen Systemen unterscheidet sich nur das Umformungsverfahren von der physikalischen in die elektrische Größe des Ausgangssignals. Für die Systemgenauigkeit spielen die äusseren Umgebungsbedingungen bei beiden Systemarten eine wesentliche Rolle. Die Eliminierung (z. B. Neigungen der Messgefässe) oder rechnerische Kompensation dieser Fehlereinflüsse ist daher je nach Genauigkeitsanforderungen notwendig.

4.2 Genauigkeitsvergleich der Abtastverfahren

Die oben aufgeführten Abtastverfahren/Systemarten sollen hinsichtlich ihrer Genauigkeiten miteinander verglichen werden. Abbildung 4 zeigt die Zuordnung der einzelnen Verfahren zu den erreichbaren Genauigkeiten.

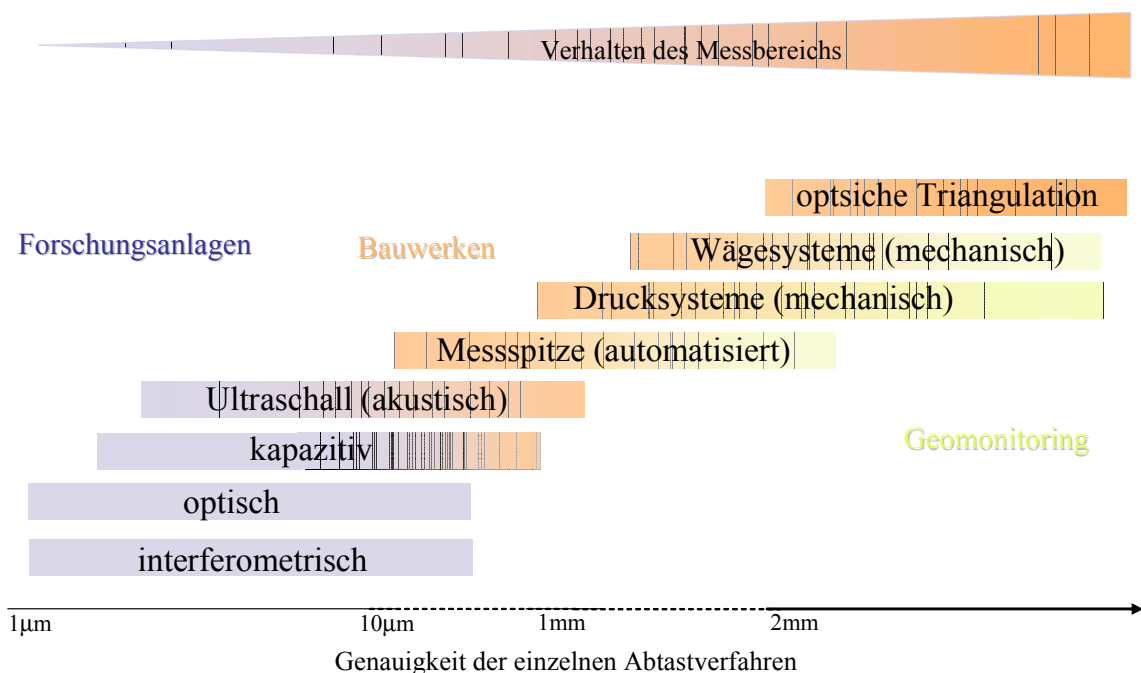


Abbildung 4: einzelne Abtastverfahren

In der obigen Übersicht sind die Drucksysteme mit ihren unterschiedlichen Umformungsverfahren zusammengefasst dargestellt, da der Abgriff des Druckes bei allen identisch ist.

5 Aktuelle hydrostatische Systeme

Hydrostatische Systeme sind innerhalb der Ingenieurgeodäsie eine interessante Messtechnik. Sie erobern durch ihre speziellen Eigenschaften sowie dem einfachen Aufbau und der Eignung für Langzeitbeobachtungen von Deformationen stetig neue Anwendungsgebiete. Ein Beispiel hierfür ist die Gruppe von Hydrostatic Leveling Systems (HLS), welche in verschiedensten Bauformen zur Überwachung von Beschleunigeranlagen entwickelt wurden und heute erfolgreich arbeiten. Alle diese Schlauchwaagensysteme (HLS) erfassen die Bewegungen der Teilchenbeschleuniger mit einer hohen Genauigkeit von etwa $10\ \mu\text{m}$ (\pm je nach System). Für denselben Genauigkeitsbereich gibt es noch das Aachener Schlauchwaagensystem, welches mit einem Ultraschallsensor arbeitet [Busch]. Weitere Entwicklungen wie das hydrostatische Messsystem der FH Oldenburg, welches ebenfalls einen Ultraschallsensor nutzt, sind auf die Überwachung von Bauwerken orientiert. Ausgewählte Präzisionschlauchwaagensysteme für die Bauwerksüberwachung sind in Abbildung 5 dargestellt.

Ein sich neu erschliessendes Anwendungsgebiet für hydrostatische Messsysteme könnte das Geomonitoring sein.

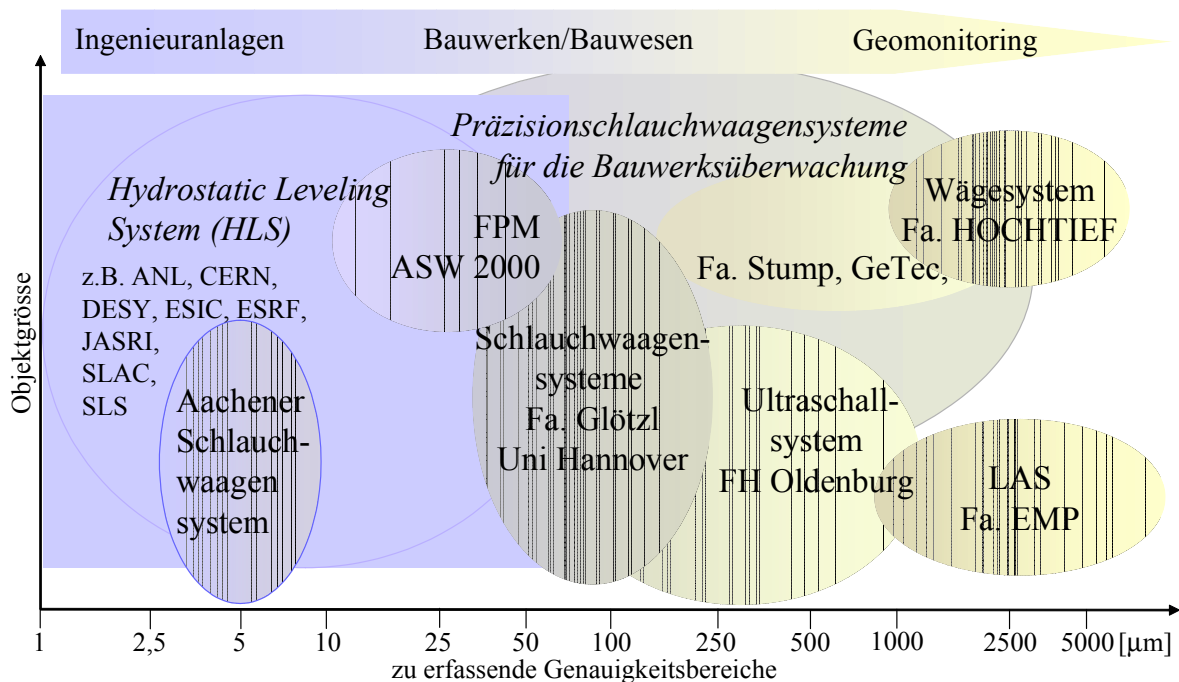


Abbildung 5: Ausgewählte hydrostatische Systeme

Auf der Grundlage des LAS² wurde ein Konzept für die Entwicklung eines Differenzdrucksystems für die Beobachtung von Bodenbewegungen erarbeitet. Durch die direkt im Boden installierten Messdosen soll unter anderem ein Beitrag zur Früherkennung von Bewegungen im Untergrund z. B. Hangrutschungen, Felsbewegungen

² Large Area Settlement System der Firma Edi Meier und Partner AG, Winterthur, Schweiz

oder auch Vulkanaktivitäten geleistet werden. Die aktuelle Forschungsarbeit am IGP konzentriert sich auf dieses Instrument, welches auf dem Gebiet des Bodenschutzes zur Schliessung der Kenntnislücken hinsichtlich Bodenverdichtungen und deren Regenerationsverhaltens dienen soll.

6 Literatur

- BRUNN, B. WEBER, H., WÜBBELMANN, H., 2001.
Hydrostatisches Höhenüberwachungssystem, Der Vermessungsingenieur, 3/2001, S. 189-192
- BUSCH, W., 1981.
Eigenschaften stationärer hydrostatischer Präzisions-Höhenmesssysteme für kontinuierliche Langzeitbeobachtungen untersucht an einem neuentwickelten Schlauchwaagensystem, Diss. TH Aachen.
- DAMES, W., JACOBS, M., 2002.
Das hydrostatische Druckschlauchwaagensystem an der Centralstation Antwerpen, Festschrift zur Emeritierung von Prof. Dr. Witte.
- INGENSAND H.; HABERRECHT, M., 2002.
Neue Messmethoden für präzise Höhenbestimmungen in der Ingenieurgeodäsie, Festschrift 150 Jahre Geodätisches Institut Dresden.
- KUHN, M., 1998.
Deformationsmessungen an vertikal schwingenden Bauwerken mit Differenzdruckgebern, Doktorarbeit an der TU Wien.
- MEIER, E., HUGGENBERGER, P., INGENSAND, H., 1998.
Precision monitoring of displacement over large areas, Hydropower & Dams, Issue Six, p. 77-80.
- MEIER, E., INGENSAND, H., 1996.
Ein neuartiges hydrostatisches Messsystem für permanente Deformationsmessungen, XII. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung, Graz, 1996.
- MÖSER, M. et al. (2000):
Handbuch der Ingenieurgeodäsie. Band 1, Grundlagen, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg
- TRESP, T., 2000.
Bauwerksüberwachung in Berlin-Messtechnische Konzepte zur Kontrolle von Verkehrs- und Ingenieurbauten, Vermessungsingenieur, 5/2000.
- FPM Holding AG: Informationsblätter:
Aktives Monitoring-Bauwerksüberwachung an einer akut gefährdeten Brückenkonstruktion in Berlin
Automatische kontinuierliche Deformationsmessung an einem 800 MW-Turbosatz in einem Braunkohlekraftwerk
- Glötzl, 2003. Produktblatt.