

## **Ausgewählte Sensorik und Methodik zur Höhenbestimmung bei der Überwachung gefährdeter Objekte**

**Michael Möser und Matthias Fuhrland**

Technische Universität Dresden, Geodätisches Institut, Ingenieurgeodäsie

### **ZUSAMMENFASSUNG :**

*Relative Höhenänderungen werden für die Überwachung und Zustandsbeschreibung eines Bauwerks oder kleinräumiger Geländebewegungen in Echtzeit durch Präzisionsnivellements nachgewiesen. Technisch sind die Verfahren zur Höhenübertragung im lokalen Bereich (z.B. über Seen) und im Nahbereich (z.B. in Kontrollgängen) durch geometrisches und hydrostatisches Nivellement gelöst. Häufig bringt aber die momentane Verfahrensgenauigkeit nicht die erwarteten Ergebnisse. Beim Seeübergangsnivellement sind Szintillation und Refraktion die Hauptprobleme. Beim Präzisionsnivellement mit Digitalnivellieren ist die Messung bei geringer Beleuchtung (z.B. im Tunnel oder in Kontrollgängen von Stau-mauern) mit wesentlichen Einschränkungen verbunden bzw. visuell und automatisiert gar nicht möglich. Ein Hauptproblem beim Langzeiteinsatz von Schlauchwaage-Systemen ist die Bildung von Gasblasen im Schlauch.*

*Der Artikel beschreibt an der TU Dresden entwickelte, praxisorientierte und innovative Ansätze zur Steigerung der Zuverlässigkeit von präzisen Höhenbestimmungen. Gezeigt werden dabei Lösungen zur Seespiegelfixierung, die Entwicklung einer leuchtenden Nivellierlatte mit einem Teilungsträger aus Plexiglas und Untersuchungen zur Verwendung von entgastem Wasser mit einer Sperrschicht aus Paraffinöl für den Einsatz in Schlauchwaagesystemen.*

### **ABSTRACT:**

*For monitoring and state description of buildings or local area movements relative altitude changes become detected in real-time by precise levelling methods. The methods for levelling over longer ranges (for example lake surfaces) and over close-up ranges (for example in inspection walkways) are technically solved by geometric and hydrostatic levelling systems. But often the actual accuracy is not the expected. In levelling over lake surfaces the effects of scintillation and refraction are the main problems. In precise levelling with digital levels the measurement under inadequate lighting (for example in tunnels or inspection walkways of retaining walls) is subject to restrictions or can be impossible in the visual and automated way. The main problem in long time measurements of hydrostatic levelling systems is the formation of blebs inside the hose.*

*The following article describes practice-oriented and innovative approaches for increasing the reliability of precise levelling measurements. Solutions for water level fixing, the development of a luminescent levelling rod with a scale graduation made of plexiglass and investigations concerning the use of degassed water combined with paraffin oil as a barrier layer in hydrostatic levelling systems will be shown.*

## 1 Einleitung

Im konstruktiven Ingenieurbau werden bei der regelmäßigen Überwachung von Bauwerken die Grenzzustände für die Tragfähigkeit und Standsicherheit geprüft. Im Rahmen der Beweissicherung sind die Gebrauchstauglichkeit sowie die Lebensdauervorhersage des Bauwerkes durch Messungen an kritischen Stellen nachzuweisen. Gleiches gilt für Setzungen und Hangrutschungen (z.B. Tagebauwandböschungen), wo für die Modellierung von klein- und großräumigen Bewegungen in bergbauintensiven Gebieten oder im Mittel- und Hochgebirge geodätische Messungen benötigt werden.

Zur Überwachung von Brücken, Hochhäusern, Türmen, Stauanlagen oder Tunneln und für den Nachweis von Bodenkompressionen oder geotektonischen Bewegungen existieren u.a. die Vorschriften

- für die Ausführung von Bauwerksprüfungen für Ingenieurbauwerke DIN 1076,
- für Stauanlagen DIN 19700,
- für Setzungsbeobachtungen an entstehenden und fertigen Bauwerken DIN 4107,
- für geotechnische Untersuchungen für bautechnische Zwecke DIN 4020 und
- die Richtlinien der Bergämter der Bundesländer.

Darin werden Grundsätze zum rechtzeitigen Erkennen von gefahrenanzeigenden Verformungen und Lageänderungen geregelt. Für jedes Ingenieurbauwerk gibt es zum Teil standardisierte Überwachungsprogramme, die durch den Stand der Messtechnik bestimmt werden. Zunehmend wird von den Betreibern und Eigentümern der Anlagen und Gebäude eine kontinuierliche Messwerterfassung gefordert, um vor Erreichen von Grenzwerten unter Belastung, Rückschlüsse auf das statische Verhalten, Alterung und Ermüdung des Materials ziehen zu können. In vielen Fällen wird gefordert, dass die erfassten Messdaten und sonstige Informationen in Echtzeit analysiert und mit Funk oder über das Internet einer Zentrale übermittelt und ggf. Alarmmeldungen ausgelöst werden. Dabei reicht die Abtastrate von Sekunden, Minuten bis zu stündlichen Wiederholungsintervallen. Mit automatisierten Überwachungsmessungen verschiedener Sensoren und einer Echtzeitauswertung wird seit einiger Zeit der Begriff „Monitoring“ verbunden. Monitoring steht dabei für Überwachung, Warnung und visuelle Darstellung baulicher oder geotechnischer Objekte.

Als geodätische Messsysteme stehen für die Erfassung von 3D-Deformationen trigonometrische Verfahren in Überwachungsnetzen mit automatisierten Tachymetern und anschließender Deformationsanalyse sowie die satellitengestützte Positionsbestimmung zur Verfügung. Die Höhenkomponente wird in diesen Fällen für die dreidimensionale Modellierung benötigt (FE-Modelle, Visualisierung als virtuelle Staumauer). Als zuverlässige Deformationsgröße wird die z-Koordinate aber meist gesondert aus einem Nivellement-Verfahren ermittelt, da die atmosphärischen Einflüsse bei der Vertikalwinkelmessung schwer erfassbar sind und die geometrischen Höhen (Geoidhöhe) aus den ellipsoidischen Höhen der GPS-Messung nicht genügend genau abgeleitet werden können.

Tab.1 : Höhenbezug und Genauigkeiten für entfernungsabhängige Relativhöhenbestimmungen

Verfahren	Bezugssystem	Genauigkeit
Schlauchwaage	relativ, lokal, bis 25 m	0,02 mm
Druckmesssystem	relativ, regional bis 100 m	0,01 mm
Feinnivellement	absolut, NHN-Höhen	0,5 mm/km bzw. <0,1 mm/20m
Stromübergangsnivellement	relativ, bis 1 km	$1,0 \cdot \sqrt{s}$
Tachymeter	relativ, bis 200 m	0,3 mgon (1mm)
Industrievermessung	Relativ, 20 m	0,15 mgon (0,05mm)
Echtzeit-GPS	absolut, ETRS89	2 cm
Geodätischer-Hochpräziser-Positionierungs-Service	absolut, ETRS89 Transformation in lokales KS	< 1 cm Postprocessing

## 2 Präzise Höhenbestimmungen

Die Bestimmung von Höhenänderungen als relative Höhendifferenzen  $\Delta h$  wird nach wie vor wegen der  $10^{-1}$  bis  $10^{-2}$  höheren Genauigkeiten gegenüber der 3D-Koordinatenbestimmung aus Distanz-, Horizontal- und Vertikalrichtungsmessungen als eigenständiges Messverfahren angewandt. Dabei wird es in Abhängigkeit von der Aufgabenstellung und den Umgebungsbedingungen notwendig sein, die verschiedenen Messmethoden wie das hydrostatische Nivellement oder das Präzisionsnivellement als optische Messmethode gegeneinander abzuwägen. Während bei hydrostatischen Messsystemen die Eigenschaften des Übertragungsmediums Wasser eine Rolle spielen, sind diesem bei den optischen Verfahren der Einfluss der übertragenden Atmosphäre mit den Phänomenen Turbulenz, Refraktion, Beleuchtung gegenüber zu stellen. Im Folgenden werden Ergebnisse vorgestellt, die aus Untersuchungen zur Steigerung der Zuverlässigkeit von präzisen Höhenbestimmungen abgeleitet wurden.

Die Übertragung von Höhen über Wasserflächen zu Fest- oder Anschlusspunkten erfolgt durch ein Strom- bzw. Seeübergangsnivellement z.B. mit der Ausrüstung von Zeiss nach Abbildung 1 und folgender Gleichung

$$\Delta h = \frac{\Delta h_1 + \Delta h_2}{2} = \frac{(r_1 + H_1) - v_1 + r_2 - (v_2 + H_2)}{2} \quad (1)$$

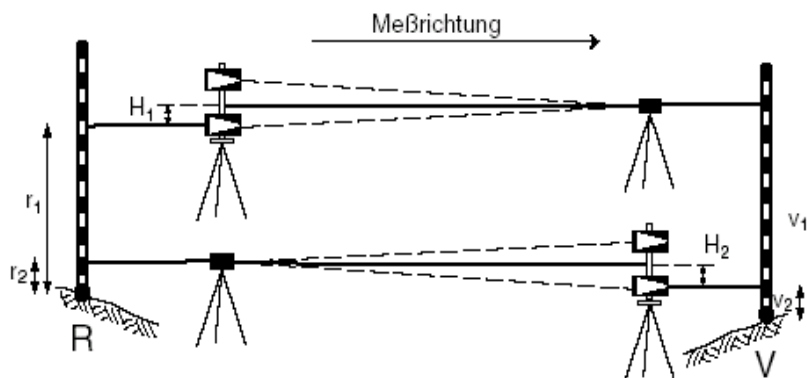


Abb.1 :Seeübergangsnivellement

Die Einflüsse der Refraktion werden bei den extrem unterschiedlichen Zielweiten (kurzer Rückblick 20m, langer Vorblick 400 bis 1000m) durch gleichzeitige beidseitige zyklische Beobachtungsfolgen (30 Minuten) und Uferwechsel kompensiert. Dabei kann die Höhe bei Entfernungen bis 1 km auf  $<1$  mm genau bestimmt werden. Auch beim Einsatz eines Digitalnivelliers DiNi 10/11 mit der zweifachen bis vierfachen Vergrößerung der Abbilder des Zeiss-Codes wurden Visuren bis 400 m realisiert (SCHAUERTE, 1999).

Mit der trigonometrischen Höhenübertragung lassen sich zwar größere Entfernungen überbrücken, aber der Einfluss des wechselnden und in seiner Größe nicht ausreichend erfassbaren Brechungsindex der Luft ist erheblich und kann zu einer systematischen Beeinflussung des Messergebnisses führen. Die Absteckung von Achsen im Brückenbau hängt bei geringen Höhenunterschieden und Entfernungen bis ca. 300m maßgeblich von der Genauigkeit der Vertikalwinkelmessung (um 100 gon) ab. Die Höhenübertragung mit Präzisionstachymetern kann dabei gegenüber langen Präzisionsnivellements bzw. einem Stromübergangsnivellement schneller und kostengünstiger erfolgen (MÖSER, 2000).

## 2.1 Digitale Seespiegelfixierung

Mit einem „Quasinivellement“ wurden 1931 im Großen Belt Höhendifferenzen aus Pegelbeobachtungen ermittelt (WEISE, 1985). Die Bestimmung der Höhen des Seespiegels zwischen zwei Ufern diente „quasi“ einer Höhenübertragung ohne Berücksichtigung von physikalischen Störungen. Dieses Prinzip entspricht einer Seespiegelfixierung an zwei Ufern und ermöglicht damit eine Höhenübertragung. Im Rahmen eines jährlich im Wägital in der Schweiz durchgeführten Praktikums der Ingenieurgeodäsie wurde das Verfahren an einem Stausee angewandt und die klassische analoge Messtechnologie durch eine automatisierte digitale ersetzt. Aus den Messreihen wird die mittlere Stauhöhe an einem Ufer (Station) bestimmt, die zur Höhenübertragung an das andere Ufer (ca. 1km, Abb. 2) zur Überwachung eines Rutschhangs westlich des Stausees (Bewegungen bis 8cm/Jahr) benötigt wurde. Im Vergleich zum geometrischen Nivellement liefert die Seespiegelfixierung genauere Ergebnisse in wesentlich kürzerer Zeit.

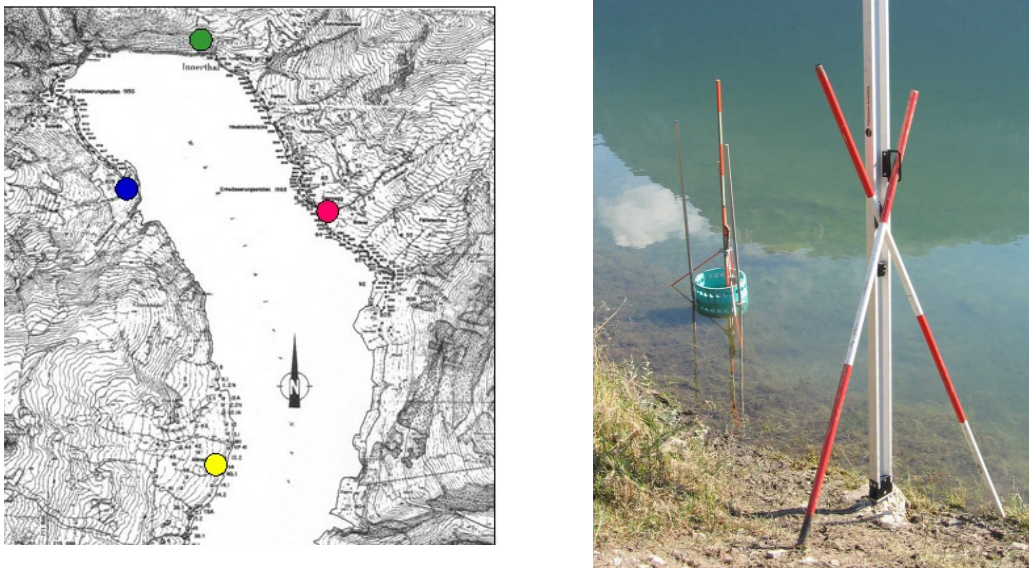


Abb.2 :Stationen der Seespiegelfixierung und Messanordnung

Bei der klassischen analogen Seespiegelfixierung wird eine Fluchtstange mit Millimeterskala in einem offenen Zylinder zur Abschirmung von Wellenbewegungen im Wasser lotrecht aufgestellt. Mit Nivellier oder Theodolit wird der Messhorizont für den Höhenanschluss realisiert. Die Ableasungen des Pegels erfolgen in einem bestimmten Zeitintervall über ca. eine Stunde.

Nach dem Prinzip der „Streckenmessung um die Ecke“ (FUHRLAND, 2004) wurde die Seespiegelfixierung automatisiert. Mit einem elektronischen Tachymeter TCR 1103 wird in horizontaler Visur ein an der Fluchtstange angebrachter Orthogonalspiegel angezielt. Mit einer Distanzmessung wird der Zielstrahl in Richtung des Schwimmers im Behälter (Abb. 3) abgelenkt (Vorblick), wobei der Schwimmer durch ein Prisma oder Reflexfolie ergänzt wird. Unter Berücksichtigung der Konstanten für den Reflektor bzw. die Reflexfolie am Schwimmer und der Konstanten des Orthogonalspiegels (Radius der Rundum-Reflexmarke und Spiegelkonstante) ist die Einsinktiefe des Schwimmers (Abb. 4) zu ermitteln. Die Distanzänderungen entsprechen der Vertikalbewegung des Schwimmers und damit des Seespiegels. Durch gleichzeitige Messung am anderen Ufer und Mittelbildung über den ganzen Tag kann der Höhenunterschied der Kippachsen der Tachymeter auf mm genau bestimmt werden. Korrekturen ergeben sich aus der unterschiedlichen Einsinktiefe der Schwimmer und wegen der Wassertemperatur. In Abbildung 3 bedeuten  $h_1$  die Ableasung der horizontalen Zielung (Rückblick) an der Nivellierlatte,  $d_1$  die Distanzmessung zum Orthogonalspiegel,  $d_2$  die Distanzmessung zum Schwimmer (Vorblick). Mit diesem Verfahren werden höhere Messfrequenzen (5

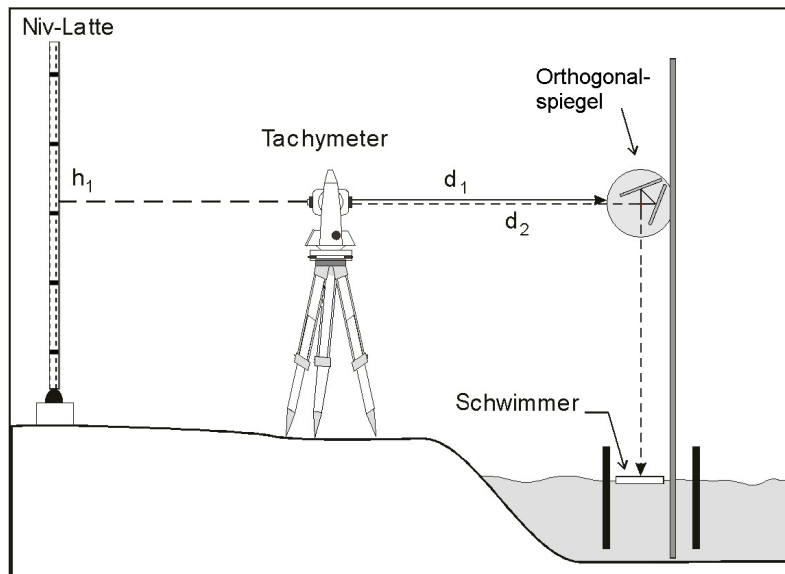


Abb.3 :Prinzip der digitalen Seespiegelfixierung

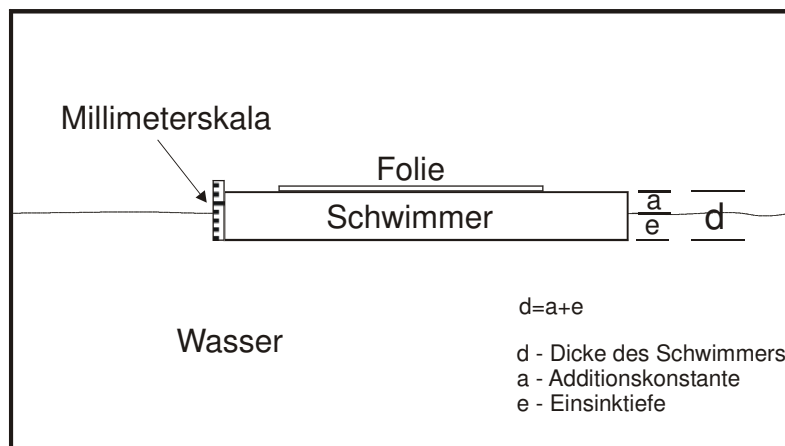


Abb.4 :Berücksichtigung der Schwimmerkonstante

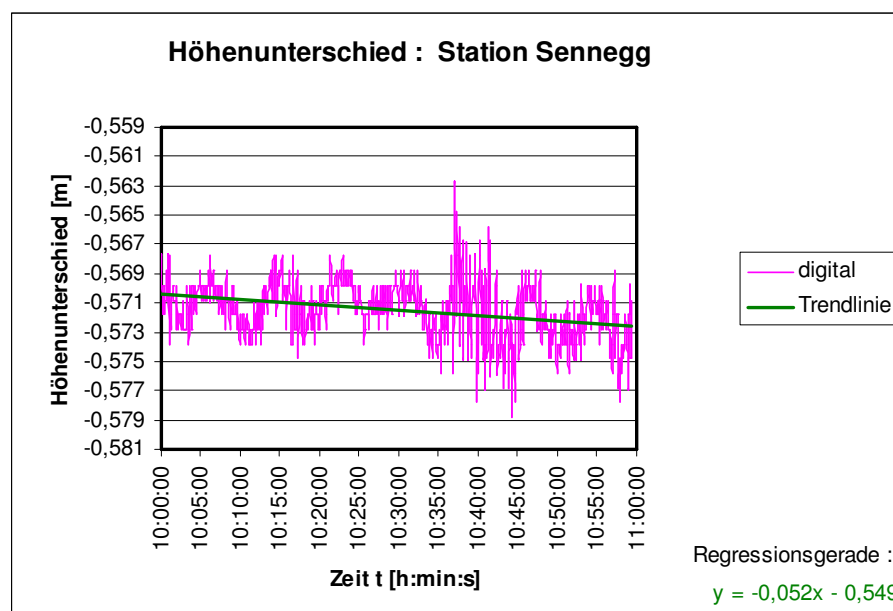


Abb.5 : Seespiegeltrend aus kombinierten Höhen- und Distanzmessungen

Sekunden) und die digitale Datenerfassung realisiert. Damit können detaillierte Auswertungen über Seespiegelschwankungen vorgenommen werden (Abb. 5). Für eine automatisierte simultane Messung mehrerer Stationen wird zur Zeit ein System mit Drucksensoren entwickelt und getestet.

## 2.2 Beleuchtete Digitalnivellierlatten

Digitalnivelliere benötigen zum scharfen Abbilden des Lattenbildes auf der CCD-Zeile und zur Auswertung des Strichcodes einen Hell-Dunkel-Kontrast. Dafür müssen bei der Messung bestimmte Lichtverhältnisse vorherrschen, um Nivellements als Überwachungsmessung nach dem Grundsatz „möglichst konstanter äußerer Bedingungen“ durchführen zu können. Bei kurzzeitigen ungünstigen Lichtverhältnissen, die beim Digitalnivellier durch die Fehlermeldung „Latte nicht lesbar“ angezeigt werden, dienen häufig Taschenlampen o.ä. Lichtquellen zur Lichtverstärkung. Für Liniennivellements unter Tage, im Tunnelbau oder in den Kontrollgängen von Staumauern wird eine konstante Lichtquelle benötigt, bei der durch eine gleichmäßige Be- und Ausleuchtung des Lattenabschnittes Messunsicherheiten minimiert werden.

Für kontinuierliche Überwachungsmessungen z.B. auf einer Station in einem Berliner U-Bahntunnel wurde neben der Motorisierung des Digitalnivelliers ein Halogenstrahler angebracht, der das Lattenbild symmetrisch zur Ziellinie ausleuchtet. Für den umgekehrten Fall, die Lichtquelle wird an der Nivellierlatte befestigt, bietet Leica Geosystems mit der GEB89 eine externe Beleuchtungseinrichtung, die als Halogenlampe an die Nivellierlatte angesteckt wird.

Die Fa. Nedo GmbH vertreibt mit der „LumiScale“ eine selbstleuchtende Barcode-Nivellierlatte, die mittels einer elektrolumineszierenden Folie realisiert wird. Durch die homogene Ausleuchtung des Lattencodes über die gesamte Länge tritt keine Schattenbildung auf (BRUNNER; WOSCHITZ, 2004). Die Elektrolumineszenz-Folie verliert bei langer Betriebsdauer ihre Leuchtwirkung, ein Austausch der Folie ist aber unproblematisch. Die „LumiScale“ bringt zwar schon die gewünschte Funktionalität, erfüllt jedoch noch nicht die Forderungen der DIN 18717 für ein Präzisionsnivelliment.

Parallel dazu wurde am Geodätischen Institut der TU Dresden in Zusammenarbeit mit der Argus GeoTech GmbH eine leuchtende Nivellierlatte von 1,50m Länge (Abb. 6) mit den Barcodes der Firmen Trimble und Leica entwickelt, kalibriert und getestet (FUHRLAND, 2006).



Abb.6 :Beleuchtete Nivellierlatte und Temperaturanzeige

Die Beleuchtung wird mit Leuchtschnüren realisiert, die in den Nivellierlattenkörper integriert werden und eine auf der Vorderseite befestigte Plexiglasplatte mit den Strichcodeelementen durchleuchten. Mit diesem Prototyp wurden u.a. Untersuchungen

- zum Temperatureinfluss auf das Plexiglas (Maßstabsänderung der Strichcodierung)
- zu einer möglichen Wärmeentwicklung durch die Leuchtschnüre

sowie Messungen mit DiNi11 und NA3003 durchgeführt. Das Wirkprinzip der Leuchtschnüre entspricht der Elektrolumineszenz und ist mit dem der oben genannten Folien identisch. Nach dem Prinzip der Kaltkathodenröhren wird es auch als „Kaltlicht“ bezeichnet. Ein wesentlicher Vorteil ist die homogene Lichtabstrahlung über die gesamte Länge. Die Stromversorgung erfolgt über Akkus. Diese und weitere elektronische Bauteile sind in dem hohlen Lattenkörper integriert. Um Tests mit verschiedenen Instrumenten durchführen zu können, wurden mehrere Plexiglasträger mit unterschiedlichen Strichteilungen bedruckt.

### 2.2.1 Reichweiten

Mit dem Prototyp einer 1,50m-Latte wurden Tests mit automatisierten Nivellieren durchgeführt. Das verwendete NA 3003 von Leica Geosystems konnte bis Zielweiten von 36m problemlos messen, sowohl bei Tageslicht, als auch bei Dämmerlicht und Dunkelheit. Die Limitierung der Reichweite ergibt sich aus dem großen Öffnungswinkel von  $2^\circ$  und der Bedingung, dass das Lattenbild mindestens  $2/3$  des Sichtfelddurchmessers abdecken muss. Bei Verwendung einer 3m-Latte dürfte demnach die doppelte Zielweite erreichbar sein.

Bei Verwendung eines DiNi 10 von Zeiss wurden problemlos Zielweiten von 80m erreicht. Größere Zielweiten wurden nicht getestet, sollten aber bis zur Grenze des Messbereiches durchaus möglich sein, da das Bild des Lattencodes mit sehr gutem Kontrast und ausreichend Helligkeit über 80m erkennbar war. Hier stellt sich im Hinblick auf die erstrebten Genauigkeiten eher die Frage nach dem Sinn längerer Zielweiten. Die visuelle Ablesung einer leuchtenden metrischen Skale war bei unterschiedlicher Außenbeleuchtung ebenfalls über 80m erfolgreich.

### 2.2.2 Lattenmaßstab

Plexiglas hat einen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von  $\alpha \approx 70$  ppm/K. Für eine 3m-Nivellierlatte ändert sich also ihre Länge um ca. 0,2 mm pro Kelvin. Bei Präzisionsnivellements muss daher die Temperatur während der Messung erfasst werden. Dafür wurde ein Temperatursensor in den Lattenkörper integriert (Abb. 6), der die Lattentemperatur zeitabhängig anzeigt und im Datenlogger aufzeichnet. Der Lattenmaßstab  $M$  berechnet sich nach

$$M = 1 + \alpha \cdot (T_{ist} - T_0) \quad (1)$$

mit  $T_0$  als Eichtemperatur der Nivellierlatte mit dem Maßstab 1. Bei Messung mit einer Latte ist  $T_0$  im Rückblick  $r$  und Vorblick  $v$  gleich. Damit ergibt sich als Korrektur

$$k = (r - v) \cdot (M - 1). \quad (2)$$

Die Bestimmung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha$  erfolgte in der Klimakammer der ETH Zürich. Innerhalb von vier Stunden wurden alle 6 Sekunden von  $+40^\circ\text{C}$  bis  $-20^\circ\text{C}$  eine Temperaturmessung und eine Ablesung mit dem DiNi 11 durchgeführt (Abb. 7). Bei  $+40$  und  $-20^\circ\text{C}$  wurde eine Vergleichsmessung mit einer Invarlatte durchgeführt, um die Stabilität des Messaufbaus zu überprüfen. Die Ablesung wurde um den Nullpunktsfehler korrigiert. Für den Ausdehnungskoeffizienten wurde  $\alpha = 66$  ppm/K bei  $T_0 = 21,9^\circ\text{C}$  ermittelt. Dies entspricht einem Maßstabsfehler von 6,6 ppm, wenn die Temperaturmessgenauigkeit 0,1K beträgt. Bei anschließender Erwärmung zurück auf  $+40^\circ\text{C}$  ergab sich derselbe Anstieg, allerdings mit leicht verschobener Kurve. Dies kann auf den hohen thermischen Widerstand des Plexiglases zurückgeführt werden. Dadurch, dass die sich schneller verändernde Umgebungstemperatur auch einen gewissen Einfluss auf den Tempera-

tursensor hat, wird nicht die tatsächliche Temperatur des Plexiglasses erfasst, sondern ein je nach Umgebungstemperatur nach oben bzw. unten verfälschter Wert. Dieser Hysterese-Fehler kann durch Mittelung beider Kalibrierkurven bzw. eine ausgleichende Funktion reduziert werden.

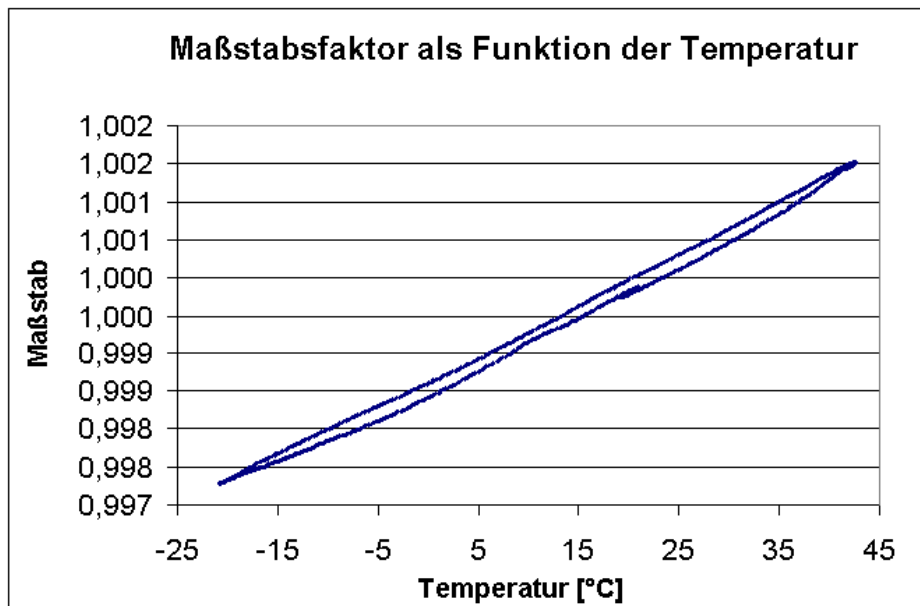


Abb.7 : Lattenmaßstab in Abhängigkeit von der Temperatur

Die Erfassung der Lattentemperatur synchron zu den Messwerten des Digitalnivelliers ermöglicht eine mathematische Korrektur des Messergebnisses im postprocessing. Mit der Digitalnivellierlatte mit Leuchtschnüren wurde eine Standardabweichung von 0,3 mm/km erreicht. Die Differenz des gemittelten Gesamthöhenunterschiedes von 7,28 m zur Messung mit Invarlatte war <0,2 mm. Der zeitliche Versatz zwischen der als Punktinformation am Nivellier eingegebenen Temperaturablesung und der Lattenablesung bewirkte Differenzen von 0,01 bis 0,03 mm gegenüber der Berechnung mit den zum Zeitpunkt der Lattenablesung im Datenlogger gespeicherten Temperaturen.

### 2.3 Langzeiteinsatz von Schlauchwaagen

Hydrostatische Messsysteme eignen sich für die relative Höhenbestimmung neben der hohen Genauigkeit und Auflösung aufgrund ihres robusten und einfachen Aufbaus im Sinne des Echtzeit-Monitorings für eine automatisierte Datenerfassung und Fernüberwachung. Auf den genannten Grundlagen lassen sich zwei verschiedene Arten von hydrostatischen Messsystemen kategorisieren (INGENSAND, 2001):

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

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

Beim hydrostatischen Nivellement mit einer Schlauchwaage wird die frei bewegliche Wasseroberfläche an einer Niveaufläche ausgerichtet. Dieses Phänomen tritt ebenfalls in miteinander verbundenen Messgefäßen auf und ist als Prinzip der kommunizierenden Röhren bekannt. Der Flüssigkeitshorizont dient somit als stabile Referenz. Als Flüssigkeit hat sich (destilliertes) Wasser, bei dem über chemische Zusätze eine Algenbildung verhindert wird, bewährt (SCHWARZ, 2002).

Die Systemunsicherheiten (zufällige Fehler), die durch Temperatur- und Luftdruckschwankungen, Kapillareffekte oder Schwereunterschiede verursacht werden, sind als Korrekturen berechnen-



bar und können am Messwert als Verbesserungen angebracht werden (MÖSER et al., 2000). Ausgehend von der Bernoullischen Gleichung und unter Beachtung eines stationären und ruhenden Systems gilt für eine Schlauchwaage mit zwei Messzylindern die Gleichgewichtsbedingung:

$$p_1 + \rho_1 \cdot g_1 \cdot h_1 = p_2 + \rho_2 \cdot g_2 \cdot h_2 \quad (3)$$

Temperaturänderungen der Flüssigkeit im Messzylinder bewirken nach Gleichung (3) eine Dichteänderung. Dies führt zu einer Volumenänderung und damit zur Verfälschung der Höhe der Flüssigkeitssäule. Aufgrund der indirekten Abhängigkeit von Temperatur- und Dichteänderungen kommt es bei einer Erwärmung bzw. Abkühlung an nur einer Messstelle zu einer Verringerung bzw. Erhöhung der Dichte und somit zu einer positiven bzw. negativen Füllstandsänderung. Daraus ist abzuleiten, dass eine ideale Füllflüssigkeit gesucht wird, die u.a. folgende Anforderungen erfüllt:

1. Der Ausdehnungskoeffizient der Flüssigkeit sollte niedrig sein, damit der Einfluss der Temperaturdifferenzen auf die Dichte minimiert wird.
2. Eine hohe Dichte bewirkt, dass Luftdruckunterschiede keine signifikanten Niveauänderungen in den Steigrohren ergeben.

Das Hauptproblem beim Langzeiteinsatz von Schlauchwaage-Systemen ergibt sich bei Temperaturänderungen durch die Bildung von Gasblasen im Schlauch. Wenn beim Sammeln kleinerer Luftblasen eine große Blase entsteht, die den gesamten Querschnitt ausfüllt und nicht entweichen kann, ist das System der kommunizierenden Röhren unterbrochen.

Einen Ansatz zur Auflösung der Luftblasen bietet die Entgasung von Wasser. Dabei werden aus dem Wasser die gelösten Gase mit einem Ultraschallbad entfernt. Mit dem Ultraschallbad SONOREX RK 100H der Fa. Bandelin wurden gemeinsam mit dem Institut für Verfahrenstechnik und Umwelttechnik der TU Dresden Untersuchungen zur Entgasung von Leitungswasser und destilliertem Wasser bei Temperaturen bis 80°C und in unterschiedlichen Zeiträumen (bis 48 Stunden) durchgeführt. Anschließend wurden die Konzentrationsänderungen von Sauerstoff und Kohlendioxid als Maß für die gelösten Gase bestimmt. Die Bestimmung des Sauerstoffgehaltes wird mit einer Genauigkeit von 1,5% und einer Temperaturauflösung von 0,5°C angegeben. Da Kohlendioxid mit Wasser chemisch zu Kohlensäure reagiert, wird die Menge des gelösten Gases über den pH-Wert bestimmt. Der pH-Wert wird dabei über die Spannung (in mV) zwischen einer Mess- und einer Bezugsselektrode in Abhängigkeit von der Temperatur ermittelt.



Abb.8 : Ultraschallbad und Sauerstoffmessgerät

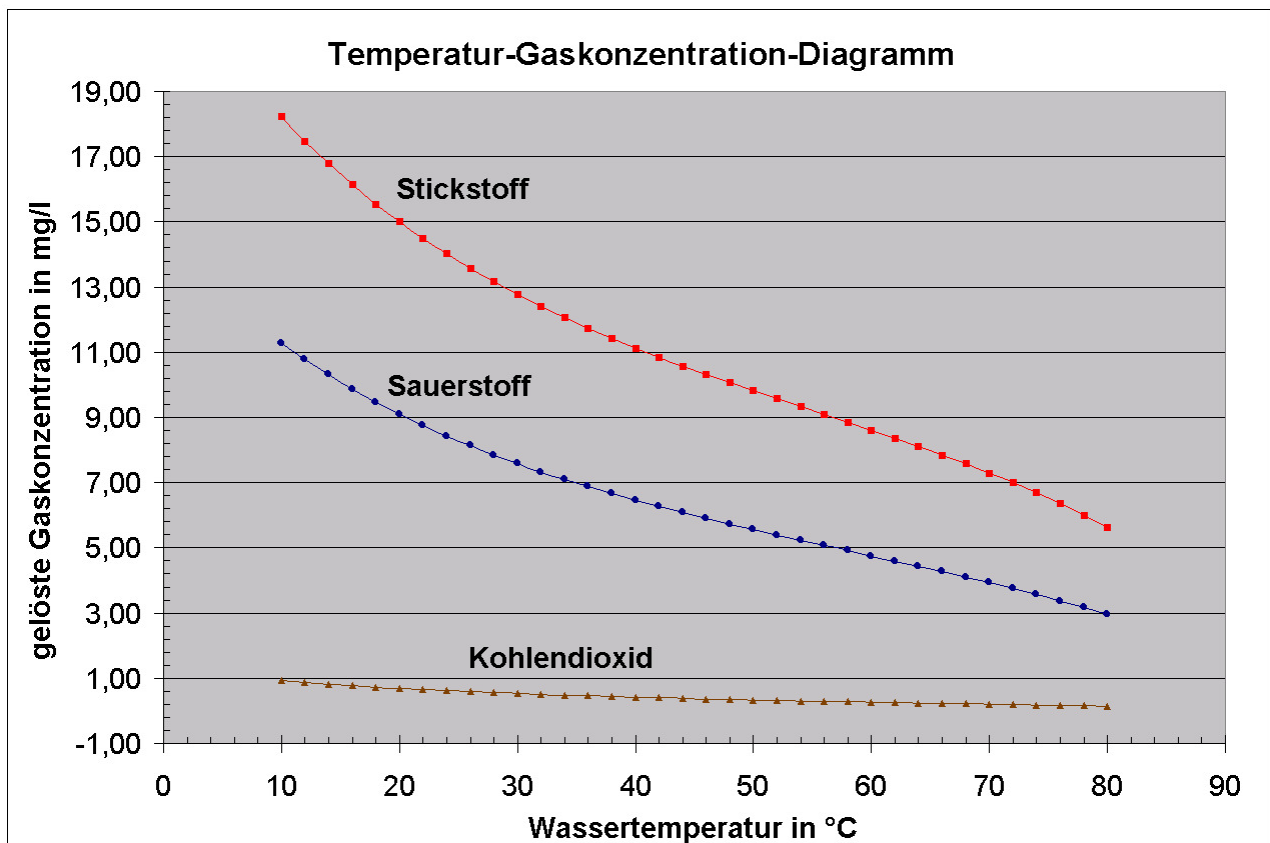


Abb.9 : temperaturabhängige Gasabsorption von Wasser

Bei einer Temperatur von 80°C und einer Entgasungsdauer von ca. 100 Minuten konnte gasarmes Wasser mit geringen Sauerstoff- und Kohlendioxidkonzentrationen hergestellt werden. Dieses entgaste Wasser erreichte innerhalb von drei Tagen bei einer konstanten Temperatur von 16°C wieder die vorherige Gaskonzentration. Für den Langzeiteinsatz von Schlauchwaage-Systemen reagiert das entgaste Wasser zu schnell wieder mit der Luft, daher muss die Geschwindigkeit der Gasabsorption gehemmt bzw. vermieden und der Gasgehalt im Wasser dauerhaft niedrig gehalten werden. Dazu wurden weitere Untersuchungen mit einer Sperrschicht aus Silikonöl bzw. Paraffinöl durchgeführt. Dieser Versuch lieferte folgende Ergebnisse:

- Wasser ohne eine Sperrschicht Paraffinöl nimmt schneller und mehr Sauerstoff auf als das Wasser mit der Sperrschicht. Auch Kohlendioxid wird schneller aufgenommen.
- Bei Temperaturwechseln zwischen rund 9°C und 26°C sind die Gasgehaltsschwankungen bei der Wasser-Paraffinöl-Kombination deutlich schwächer als bei Wasser ohne Sperrschicht.
- Die Verdunstung von Wasser wird durch die Paraffinölschicht verhindert. Die Verdunstung von Paraffinöl bei Raumtemperatur geht gegen null.

Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse wird für den Langzeiteinsatz eines Schlauchwaage-Systems vorgeschlagen, das Wasser vor dem Befüllen warm zu entgasen. Die Befüllung des Systems sollte ebenfalls mit warmen (60°C – 80°C) entgastem Wasser blasenfrei erfolgen. Anschließend muss sofort jede Wasserfläche, welche Kontakt zur Umgebungsluft hat, mit einer Schicht Paraffinöl überdeckt werden. Durch diese Vorgehensweise wird zunächst der Gasgehalt im Wasser niedrig gehalten und steigt nach der Abkühlung, verzögert durch das Paraffinöl, nur langsam auf einen relativ niedrigen Wert an. Auftretende Temperaturschwankungen auf das Meßsystem werden nur in geringem Umfang eine Änderung des Gasgehaltes im Wasser bewirken, da die Sperrschicht Paraffinöl die Absorption und Desorption verringert. Aufgrund dieser Dämpfung der Gasgehaltsschwankungen und des niedrigen Gasgehaltes im Wasser, wird die Bildung von Gasbläschen unterbunden. Zudem kann, abhängig von der Umgebungstemperatur am Messort, das Schlauchsystem

durch eine Kühlung weitestgehend auf einer konstanten Temperatur gehalten werden, um somit die Gasbläschenbildung zusätzlich zu verhindern.

### 3 Ausblick

Der Beitrag hat mit seinen Untersuchungen gezeigt, dass auch in bekannten Messverfahren zur präzisen Höhenbestimmung noch Genauigkeitspotentiale zu finden sind, die durch genauere Bestimmung von Korrekturen und instrumentelle Verbesserungen am Messmittel ausgeschöpft werden können.

Wie gezeigt, ist das Verfahren der digitalen Seespiegelfixierung dazu geeignet, hochgenaue Höhenübertragungen an Binnengewässern vorzunehmen. Denkbar ist neben dem lokalen Einsatz an Talsperren und Binnenseen auch der großräumige Einsatz in der Landesvermessung z.B. entlang von Kanälen. Entsprechende Untersuchungen hierzu sollen an der TU Dresden stattfinden.

Für das Präzisionsnivellement unter Tage, bei Dunkelheit und bei schlechter Beleuchtung zeichnet sich eine instrumentelle Lösung ab, die in absehbarer Zeit zu den Standardmesseinrichtungen gehören wird. Spezielle Nivellierlatten werden zukünftig neben dem Maßstab für die Höhenübertragung auch integrierte Funktionen für die Helligkeit und zur aktuellen Temperaturkorrektur anbieten.

Auch im Bereich der Schlauchwaage-Systeme sind mit dem Entgasen und Versiegeln des Wassers Möglichkeiten aufgezeigt worden, die Messung zuverlässiger zu gestalten. Da das Verfahren sehr einfach und kostengünstig realisiert werden kann, ist ein Einsatz in der Praxis zu erwarten.

### 4 Literatur

BRUNNER, F., WOSCHITZ, H. (2004): Die selbstleuchtende Nivellierlatte, Allgemeine Vermessungsnachrichten, Heft 3, 104-109

FUHLAND, M. (2004): Das passive Exzentrum – Streckenmessung um die Ecke. Der Vermessungsingenieur, Heft 6, S. 478-481

FUHLAND, M. (2006): Die leuchtende Nivellierlatte – Präzision ohne Invarband, ZfV Heft 2 / 2006

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

MÖSER, M. et al. (2000): Handbuch der Ingenieurgeodäsie. Band 1: Grundlagen, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg

SCHAUERTE, W.; MICHEL, C.; TÜLLMANN, U. (1999): Neue Einsatzgebiete für Digitalnivelliere aufgezeigt am Beispiel des Zeiss DiNi 10/11. Vermessungswesen und Raumordnung 61/2, S. 97 – 113.

SCHWARZ, W. (2002): Geodätische Messverfahren für das Bauwesen. 56. DVW-Fortbildungseminar, „Interdisziplinäre Messaufgaben im Bauwesen 16./17.9.2002 in Weimar. Schriftenreihe des DVW, Band 43

WEISE, H. (1985): Hydrokinamatisches Nivellement. Vermessungstechnik, Heft12, S. 406 - 409