

RUTSCHUNGSBEOBACHTUNGEN UND HÖHENÜBERTRAGUNG AN DER TALSPERRE SCHRÄH (SCHWEIZ)

Jan Schmidt und Michael Möser
Technische Universität Dresden
Geodätisches Institut
Professur Ingenieurgeodäsie
01062 Dresden

Kurzfassung: Seit Anfang der 90er Jahre werden durch Studenten der TU Dresden im Rahmen eines Praktikums der Vertiefung Ingenieurgeodäsie Überwachungsmessungen an der Staumauer Schräh im Wägital (Schweiz) durchgeführt. Die Betreiber des Kraftwerkes Wägital stellen hierfür ihre Anlagen frei zur Verfügung, so dass verschiedenste Messprogramme, die dem Nachweis horizontaler und vertikaler Bewegungen der Staumauer und von Hangrutschungen dienen, bearbeitet werden können. Dafür werden unter anderem geometrische Präzisionsnivelements, die See-spiegelfixierung und ein Seeübergangsnivellement durchgeführt. In diesem Beitrag werden spezielle Messtechnologien zur präzisen Höhenübertragung und die Auswertung der RTK-GPS Messungen am Rutschhang vorgestellt.

1. Einführung



Abb. 1: Staumauer Schräh

Im Wägital im Schweizer Kanton Schwyz werden seit 30 Jahren im Rahmen eines Praktikums „Ingenieurvermessung“ von Studenten Überwachungsmessungen im Bereich des Kraftwerkes mit den Staumauern Schräh (Abb. 1) und Rempen durchgeführt. Seit Anfang der 90er Jahre werden diese Messungen gemeinsam von Mess-trupps der Fachhochschule Frankfurt/Main und der TU Dresden unter fachlicher An-leitung des Kraftwerksbetreibers jährlich über 2 Wochen im September organisiert.



Abb. 2: Wägitaler See

Der Wägitaler See (Abb. 2) hat ein Volumen von 150 Mio. m³ und wird durch eine 110 m hohe Gewichtsstaumauer im Norden abgeschlossen. Der See wird alljährlich im Winterhalbjahr um 18 bis 20 m abgesenkt und im Sommer wieder aufgefüllt. Der See liegt zwischen dem Alpenrand im Norden und stabilen Kalkwänden im Süden. In dem relativ flachen und weichen dazwischen liegenden Gelände waren schon vor der Errichtung des Stausees natürliche Rutschungen bekannt. An der West- und Ostseite des Sees wurden mehrere Rutschgebiete lokalisiert, die bis an das Seeufer reichen und deren Bewegungsvektoren durch die Seespiegelschwankungen (Stauhöhe) beeinflusst werden. Dadurch kann der See auch nur auf eine bestimmte Stauhöhe abgesenkt werden. Die geodätischen Kontrollmessungen an den Staumauern Schräh und Rempen sowie die regelmäßigen Überwachungen der angrenzenden Rutschgebiete erfolgen turnusgemäß durch die Nordostschweizerische Kraftwerk AG.

Die Überwachungsmessungen dienen dem Nachweis

- von vertikalen Verformungen des Mauerfußes und der Staumauerkrone,
- von vertikalen Geländebewegungen auf dem Niveau der Seestraße um den Wägitaler See und
- von Hangrutschungen im Innerthal

im Zusammenhang mit Änderungen der Stauhöhe und dem Betrieb des Kraftwerkes.

In den vermessungstechnischen Projekten während des studentischen Praktikums werden die Höhenübertragungen mit geometrischem Präzisionsnivelement, mit vertikaler mechanischer und elektrooptischer Präzisionsdistanzmessung, Wasserspiegelfixierungen (Abb. 3) und Seeübergangsmessungen realisiert. Mit Tachymetern hoher Genauigkeit erfolgen Messungen im Triangulationsnetz, trigonometrische Höhenmessungen, Alignements sowie Präzisionsdistanzmessungen. Der Rutschhang

wird mit RTK-GPS beobachtet. Außerdem werden in den Kontrollgängen der Stau-
mauer die Blockfugen gemessen und mit den elektronischen Libellen Talyvel und
Nivel Neigungsmessungen ausgeführt.

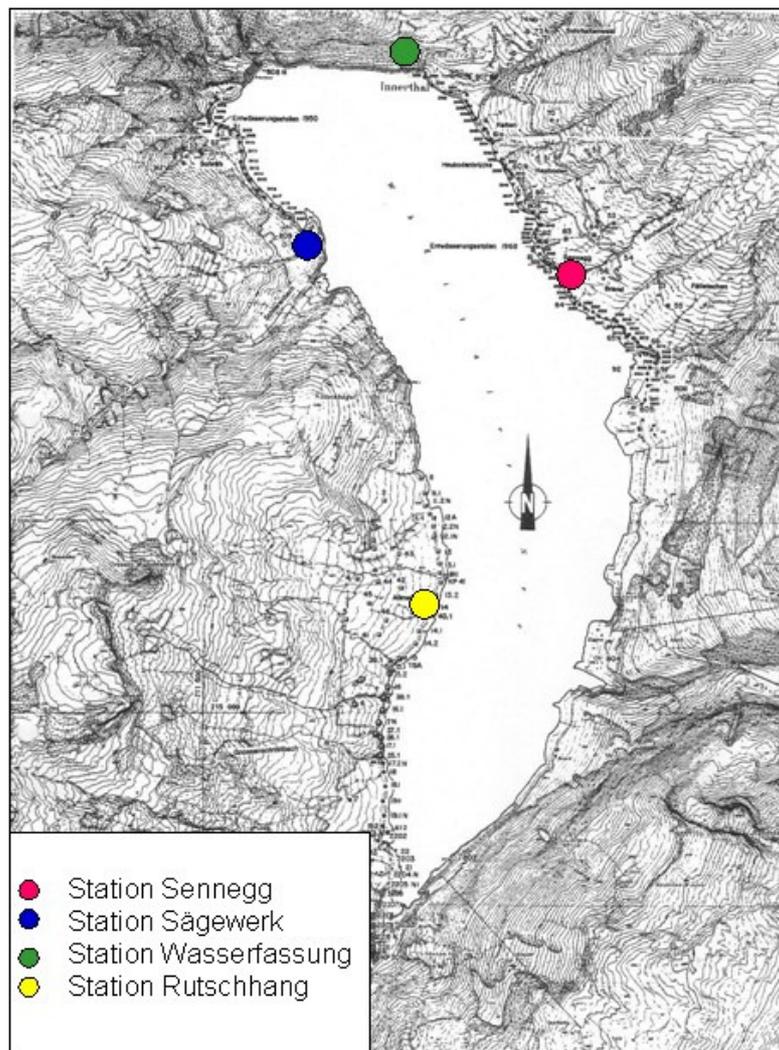


Abb. 3: Der Wägitaler See mit den Standpunkten für die Seespiegelfixierung

2. Höhenkontrolle der Uferstraße

Um den Wägitaler See führt eine durchgängig befahrbare Straße mit einer Gesamt-
länge von etwa 12 km, deren Niveau ca. 5 – 10 m über der maximalen Staukote des
Gewässers liegt. Um Einflüsse der Stauanlage auf die angrenzenden Berghänge und
die vertikale Stabilität des Absperrbauwerkes selbst überprüfen zu können, ist eine
höhenmäßige Überwachung definierter Punkte entlang dieser Uferstraße vorgese-
hen. Die Messung einer Nivellementsschleife dieser Länge ist nur mit hohem perso-
nellem sowie materiellem Aufwand möglich. Außerdem hat sich gezeigt, dass in wei-
ten Bereichen keine oder nur geringfügige Setzungen auftreten und Gebiete mit grö-
ßeren Bewegungen durch andere Messtechniken wie z.B. RTK-GPS wirtschaftlicher
überwacht werden können. Deshalb wird nur noch im nördlichen Seebereich und
über die Staumauer selbst eine Nivellementslinie gemessen. In den folgenden Kapi-
teln sollen die Messung und Auswertung dieser beschrieben, auf Nachteile einge-
gangen sowie Vorschläge zur Kontrolle aufgezeigt werden.

2.1. Präzisionsnivellement

Auf der Uferstraße entlang des Wägitaler Sees wird eine Nivellementsline mit einer Gesamtlänge von ca. 4 km ausgehend von der rechten Talseite (Station Sennegg) über die Mauerkrone zur linken Talseite (Station Sägewerk) in fünf Teilabschnitten gemessen (Abb. 3). Die Messung erfolgt als Präzisionsnivellement über fest vermarkte Wechsellpunkte. Die Höhen der einzelnen Zwischenpunkte werden mittels freier Netzausgleichung mit dem Programm PANDA berechnet. Die hierfür erforderlichen Näherungshöhen entstammen einer definierten Nullepoche, wodurch eine anschließende Deformationsanalyse verschiedener Folgeepochen möglich ist.

Die Beurteilung der inneren Genauigkeit des Netzes erfolgt anhand der a-posteriori ermittelten mittleren Kilometerfehler, die bei den Messungen der letzten Jahre mit Werten zwischen 0,4 und 0,7 mm/km berechnet wurden. Hierbei hat sich gezeigt, dass die größeren Beträge bei Messungen unter ungünstigen meteorologischen Bedingungen (direkte Sonneneinstrahlung, Wind) aufgetreten sind. Die Standardabweichung der ausgeglichenen Punkthöhen ist hingegen ein Kriterium für die äußere Genauigkeit des Netzes. Die Ausgleichung der Epoche 2003 liefert hierfür z.B. Werte zwischen 0,2 und 0,5 mm, wobei auffällig ist, dass die Genauigkeit von der Mitte der Nivellementsline abnimmt. Dies ist in der Anlage des Netzes als offene Nivellementsline begründet, was sich auf eine anschließende Deformationsanalyse allerdings negativ auswirkt, da eventuell auftretende Punktverschiebungen in diesen Bereichen auf Grund des schlechteren Genauigkeitsniveaus erst bei größeren Setzungen erkannt werden.

Aus diesem Grund sollen nachfolgend zwei Verfahren vorgestellt werden, die es ermöglichen ein in sich geschlossenes Nivellementsnetz auszugleichen, in dessen Ergebnis alle Punkthöhen mit homogener Genauigkeit vorliegen.

2.2. Seespiegelfixierung

Die Seespiegelfixierung dient im oben beschriebenen Messgebiet zur Kontrolle und Stützung der beiden offenen Enden der Nivellementsline entlang der Uferstraße, kann aber auch zur Höhenübertragung zu Neupunkten genutzt werden. Es wird bei diesem Verfahren davon ausgegangen, dass die Wasseroberfläche eines stehenden Gewässers ein einheitliches Höhenniveau repräsentiert. Die Bestimmung der Absoluthöhe des Wasserspiegels erfolgt bei diesem Projekt an drei, im nördlichen Bereich der Talsperre gelegenen Punkten (Sennegg, Sägewerk und Wasserfassung) durch Mittelung der Einzellösungen bei simultaner Beobachtung. Hierbei wurde bisher das unten beschriebene analoge Verfahren angewandt. Um die Nachteile dieser Methode zu eliminieren und einen durchgängigen Datenfluss zu ermöglichen, wurde die Realisierung eines digitalen Verfahrens untersucht, welches ebenfalls im folgenden vorgestellt werden soll. Für eine weitere Automatisierung der simultanen Beobachtung an mehreren Stationen wird zur Zeit die Einsatzmöglichkeit von Drucksensoren getestet, auf die hier allerdings noch nicht näher eingegangen wird.

Analoges Verfahren

Bei der analogen Seespiegelfixierung wird der Pegelstand des Seespiegels an einer im Wasser lotrecht stehenden Fluchtstange mit Millimeterteilung durch die Optik eines Theodolits abgelesen.



Um Einflüsse von kurzperiodischen Wasserspiegelschwankungen (Wellen) weitestgehend zu eliminieren, wird die Fluchtstange durch einen entsprechenden Behälter in Form eines beidseitig offenen Zylinders geschützt (Abb. 4).

Über eine Gesamtmesszeit von einer Stunde wird die Höhe des Wasserstandes simultan an mehreren Stationen alle 15 Sekunden an der Pegellatte abgelesen und protokolliert. Der Höhenanschluss an einen in Ufernähe befindlichen Festpunkt erfolgt mittels geometrischem Nivellement, wodurch die Absoluthöhe des Wasserspiegels ermittelt werden kann.

Grundvoraussetzung für die praktische Durchführung der Messung ist ein homogener Wasserspiegel, d.h. während der Beobachtungsphase dürfen dem See keine großen Wassermengen zugeführt oder entnommen werden.

Abb. 4: Messeinrichtung Seespiegelfixierung

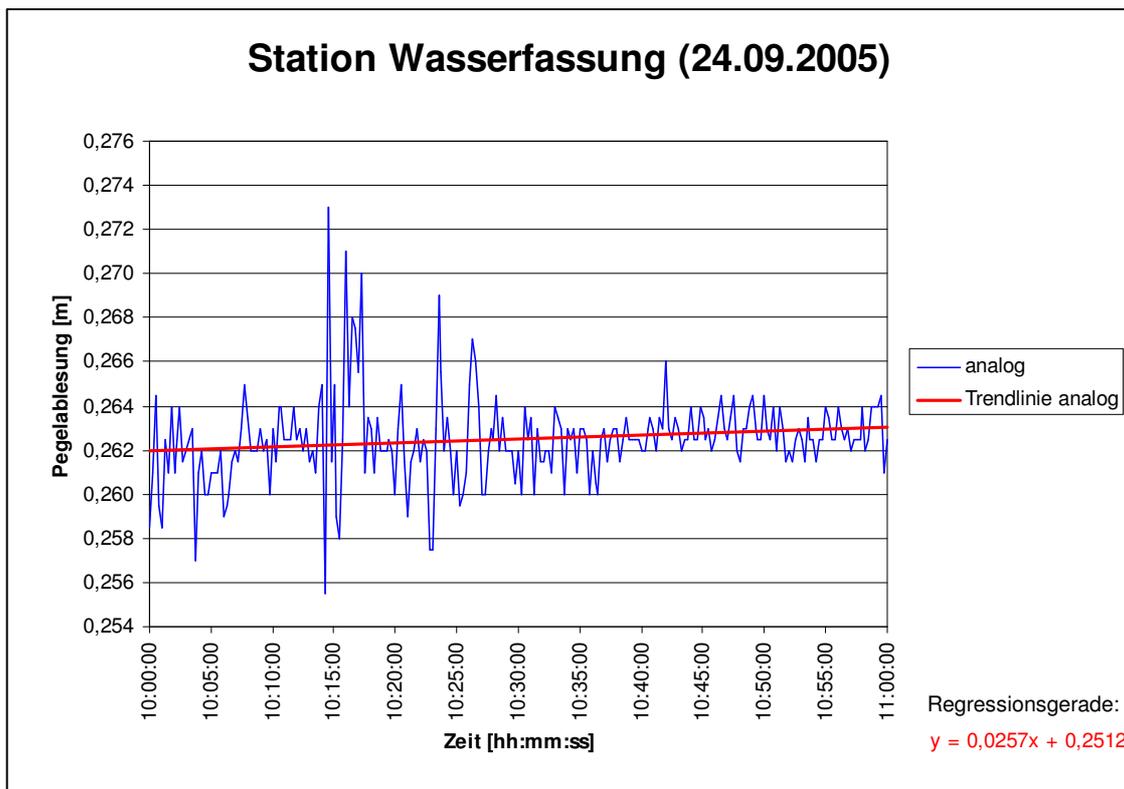
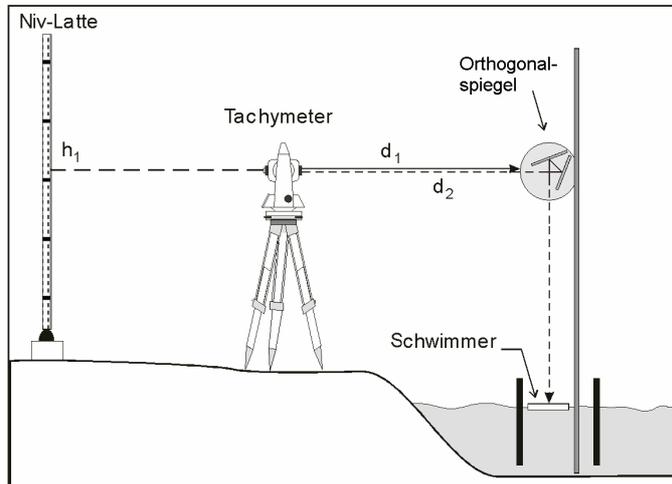


Abb. 5: Ergebnis der analogen Seespiegelfixierung

Die Variation des Pegelstandes einer Station ist in Abbildung 5 dargestellt. Hierbei wird deutlich, dass der zur Abschirmung der Wellen eingesetzte Behälter diese nicht in vollem Umfang eliminiert. Wird der Mittelwert aller Beobachtungen für die Berechnung der Wasserspiegelhöhe verwendet, beträgt die Standardabweichung 0,2 mm.

Digitales Verfahren

Die Automatisierung der Seespiegelfixierung erfolgt nach dem Prinzip der „Streckenmessung um die Ecke“ (FUHRLAND, 2004). Hierbei wird ein, an einer lotrecht im Wasser stehenden Fluchtstange angebrachter, Orthogonalspiegel mittels eines elektronischen Tachymeters in horizontaler Visur angezielt. Der Zielstrahl wird durch den Spiegel um 90° in Richtung Wasseroberfläche abgelenkt und trifft dort auf einen



Schwimmer, welcher durch das Aufbringen einer Reflexfolie als Reflektor für die Distanzmessung genutzt werden kann. Bei bekannter Kippachshöhe des Tachymeters (Ableseung von h_1 an einer Nivellierlatte) und gemessener Strecke zwischen Tachymeter und Orthogonalspiegel (d_1) entspricht bei Berücksichtigung der Spiegelkonstanten die Distanzänderung zum Schwimmer (d_2) der Vertikalbewegung des Seespiegels (Abb. 6).

Abb. 6: Prinzip der digitalen Seespiegelfixierung

Mit diesem Verfahren werden höhere Messfrequenzen (5 Sekunden) und die digitale Datenerfassung realisiert. Damit können detaillierte Auswertungen über Seeschwankungen vorgenommen werden.

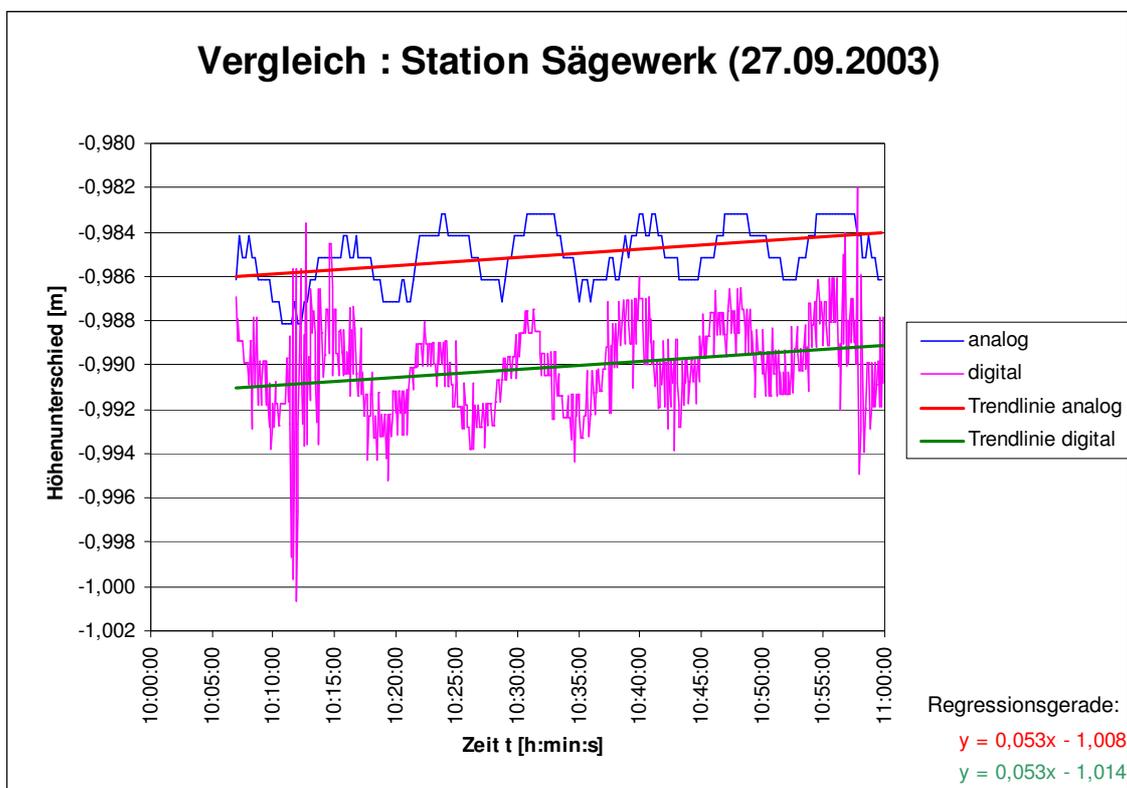


Abb. 7: Vergleich der analogen und digitalen Seespiegelfixierung

In Abbildung 7 sind die Ergebnisse der analogen und digitalen Seespiegelfixierung für eine Station dargestellt. Hier ist zunächst zu erkennen, dass die höhere Messfrequenz bei dem digitalen Verfahren eine bessere Auflösung zur Folge hat. Vergleicht man Abbildung 5 und 7 wird außerdem deutlich, dass der Wasserspiegel unter bestimmten Einflussparametern keine ruhende Oberfläche darstellt, sondern eine harmonische Schwingung in Form einer Sinusfunktion durchführt. Diese spiegelt die Eigenschwingung des Sees wider, wobei aus den umfangreichen Messungen über mehrere Jahre eine einheitliche Periodendauer von etwa 7 - 8 Minuten abgeleitet werden kann. Ursachen hierfür können starker Zufluss bei oder nach Niederschlagsereignissen, Windeinflüsse und Luftdruckschwankungen sein. Weiterhin ist an Abbildung 7 auffällig, dass die Regressionsgeraden beider Verfahren zwar den gleichen Anstieg verzeichnen, aber einen parallelen Versatz von etwa 5 mm aufweisen. Dieser liegt in der nicht berücksichtigten Eintauchtiefe des Schwimmers beim digitalen Verfahren begründet, welcher allerdings bei Nutzung identischer Schwimmer an allen Stationen eliminiert wird.

Ein Ziel dieses Verfahrens sollte die Stützung der Nivellementsline entlang der Uferstraße von Station Sennegg nach Station Sägewerk sein. Fasst man alle Beobachtungen (Anschlussnivellement zum uferseitigen Festpunkt und Pegelablesung) beider Stationen zusammen, kann der Höhenunterschied zwischen den beiden Festpunkten berechnet werden. Dieser beträgt für die Epoche 2003 bei der analogen Messung 0,4191 m und bei dem digitalen Verfahren 0,4186 m. Zur Beurteilung der Genauigkeit kann der ausgeglichene Höhenunterschied der Nivellementsline von 0,4192 m herangezogen werden. Hier wird deutlich, dass die aufgezeigte Methode sehr gute Ergebnisse für die Höhenübertragung über ruhende Gewässer darstellt. Werden die ermittelten Höhenunterschiede der Seespiegelfixierung in die Netzausgleichung eingeführt, erhält man zudem für die Höhen aller Netzpunkte annähernd einheitliche Standardabweichungen.

2.3. Talübergangsnivellement

Eine weitere Möglichkeit der Stützung der Nivellements entlang der Uferstraße bietet ein Talübergangsnivellement. Die Einflüsse von Restfehlern der Instrumentenjustierung, Erdkrümmung und Refraktion werden bei den extrem unterschiedlichen Zielweiten (kurzer Rückblick 20 m, langer Vorblick 1000 m) durch gleichzeitige beidseitige zyklische Beobachtungsfolgen kompensiert. In dem hier beschriebenen Projekt kommt die Talübergangsausrüstung von Zeiss zum Einsatz. Die Besonderheit dieses Systems besteht darin, dass das Messinstrument einer Station aus zwei Nivellieren besteht, die jeweils mit einem Drehkeilvorsatz ausgerüstet und auf einem Spezialträger montiert sind (Abb. 8). Der Drehkeilvorsatz ermöglicht ein definiertes Verschwenken des Zielstrahles, wodurch die Zieltafeln auf der anderen Uferseite angemessen werden können. Die Zieltafeln sind in einem definierten Abstand an einem Zieltafelständer montiert (Abb. 9). Der Betrag der Zielstrahlauslenkung ist an einer Skala des Drehkeiles ablesbar. Durch eine gegenseitige Kollimation der beiden Geräte einer Station wird erreicht, dass die Restneigung der Zielachse des einen Gerätes mit umgekehrtem Vorzeichen auf das andere übertragen wird und das Mittel der Beobachtungen diesbezüglich fehlerfrei ist. Durch dieses Verfahren ist ein Austausch der Instrumente zwischen den beiden Uferseiten hinfällig. Theoretisch sollte mit diesem Verfahren der Höhenunterschied auf 1 km Entfernung mit einer Standardabweichung von 0,5 – 1 mm ermittelt werden können. Den größten Fehlereinfluss bei der praktischen Umsetzung liefern hierbei Unterschiede in der Refraktion im Uferbereich der Instrumentenstandpunkte (DRODOFSKY, 1960).



Abb. 8: Instrumentenausrüstung

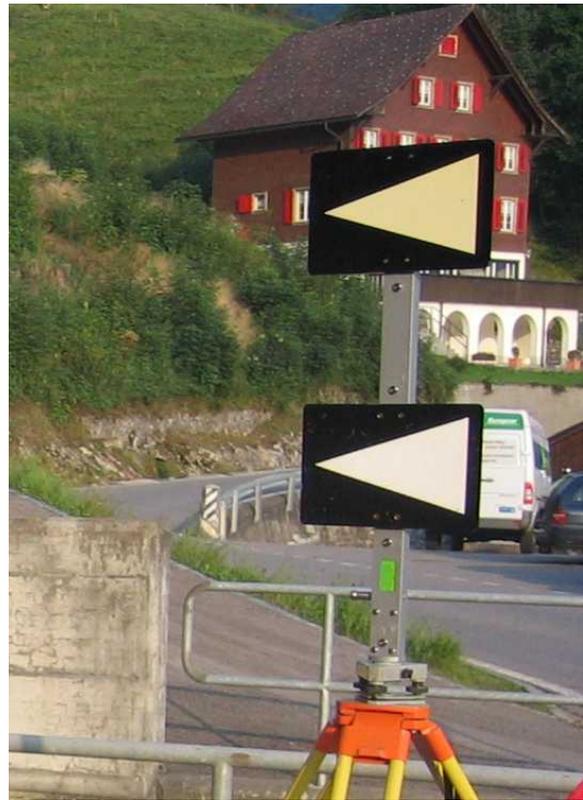


Abb. 9: Zieltafelständer

Für die praktische Anwendung des Verfahrens müssen auf den beiden Talseiten zwei Punkte erkundet werden, die in etwa auf gleichem Höhenniveau liegen. Außerdem sollten in der Nähe der Instrumentenstandpunkte Nivellements festpunkte vorhanden sein, um die Messung des Rückblickes einfach gestalten zu können. Die langen Vorblicke über den See werden in 6 Sätzen gemessen, wobei ein Satz aus einer Kollimationsserie und jeweils acht Messungen zu der oberen und unteren Zieltafel besteht. Die aus den Beobachtungen berechneten Höhenunterschiede können für eine Genauigkeitsbeurteilung wieder mit denen aus dem Nivellement entlang der Uferstraße verglichen werden. Hierbei hat sich gezeigt, dass die Differenzen bei den verschiedenen Messepochen nie kleiner als 4 mm waren. Für eine Einbindung in das Nivellementsnetz ist dieser Wert zu groß, weshalb die Ergebnisse dieses Verfahrens nicht in die Gesamtausgleichung einbezogen werden. Ursachen können in der stark differierenden Topographie an den beiden Uferseiten gesehen werden. Während sich der westlich liegende Instrumentenstandpunkt an einer steilen Böschung dicht am See befindet, ist der gegenüberliegende Punkt weiter vom Ufer entfernt, wodurch der Zielstrahl hier eine größere Distanz über Land zurücklegen muss. Es können somit unterschiedliche Refraktionsverhältnisse in Instrumentennähe auftreten, die auf das Ergebnis genauigkeitsmindernd wirken.

3. Beobachtung der Rutschhanggebiete

Schon vor der Errichtung der Stauanlage in den Jahren 1922 bis 1925 und dem anschließenden Ersteinstau waren in einigen angrenzenden Hangbereichen natürliche Rutschungen vorhanden. Das Stauregime der Anlage sieht ein Absenken des Wasserstandes in den Wintermonaten und ein Auffüllen im Sommer vor. Es konnte relativ schnell festgestellt werden, dass einige der bekannten Hangbewegungen durch diese Seespiegelschwankungen noch verstärkt werden. Je schneller und je tiefer der

See abgesenkt wurde, desto stärker ist seine stabilitätsmindernde Wirkung auf die angrenzenden Berghänge. Die Bewegungen dieser weisen demzufolge einen ausgeprägten Jahresrhythmus auf. Um die Kriechgeschwindigkeiten möglichst gering zu halten, sehen die Stauvorschriften eine maximale Absenkgeschwindigkeit von 1 m pro Woche und eine maximale Absenkung von 20 m vor. Die horizontalen Verschiebungen betragen im Jahresmittel in Seenähe am östlichen Seeufer einige Zentimeter und am westlichen Ufer in den akuten Rutschgebieten einige Dezimeter, wobei die Vektoren hangparallel verlaufen. An der westlichen Talseite gibt es allerdings auch ein Gebiet in dem die Bewegungen größer sind und Punktverschiebungen von mehreren Metern pro Jahr auftreten können (Abb. 10). Die Seespiegelschwankungen können hierfür allerdings nicht verantwortlich sein, da die Bewegungsgeschwindigkeit zum Ufer hin abnimmt. Es lässt sich jedoch ein Zusammenhang mit starken Schnee- und Regenereignissen feststellen.

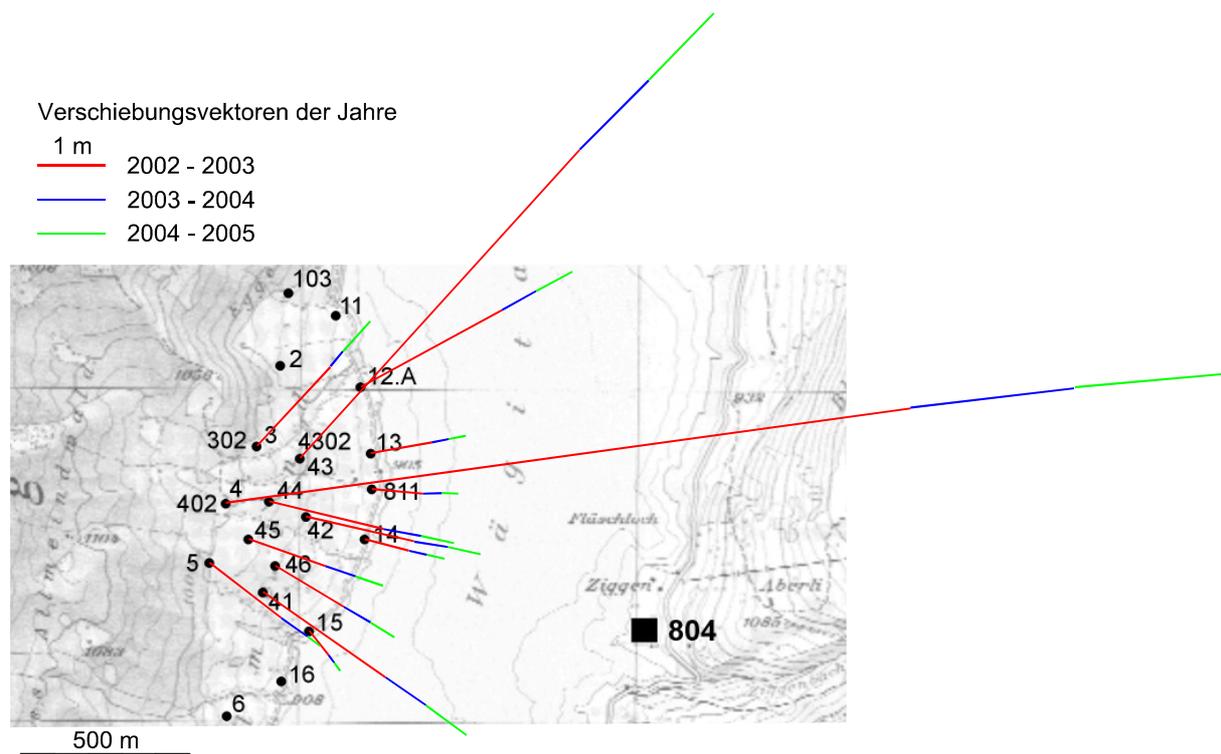


Abb. 10: Bewegungsvektoren eines ausgeprägten Rutschhanges

Die Beobachtung der relevanten Hangbewegungen erfolgt auf der Grundlage eines dichten Netzes vermarkter Punkte. Dieses Netz ist bis vor einigen Jahren noch als reines Richtungsnetz gemessen worden. Dies erforderte allerdings einen hohen logistischen Aufwand, da alle Punkte signalisiert werden mussten, sowie die notwendigen Sichten herzustellen waren. Auch die Genauigkeit der Ergebnisse war nicht immer zufrieden stellend, da oftmals ungünstige Schnittbedingungen für die Zielpunkte vorherrschten.

Aus den genannten Gründen erfolgen die Kontrollmessungen der Rutschhangpunkte seit einigen Jahren mittels RTK-GPS. Der Bezug der hierfür notwendigen Korrekturdaten wird über eine eigene lokale Referenz sichergestellt, welche auf der rechten Talseite in Seemitte positioniert wird. Um Koordinaten im lokalen Bezugssystem zu erhalten, werden vor Messungsbeginn die Koordinaten mehrerer stabiler Festpunkte im WGS84 bestimmt und darüber vor Ort die Transformationsparameter berechnet. Dadurch ist für den Messenden auch keine Ortskenntnis über die Lage der aufzu-

messenden Punkte erforderlich, da diese anhand der Koordinaten der letzten Epoche im Absteckmodus aufgesucht werden können. Als Ergebnis der Messung liegen in Echtzeit die lokalen Koordinaten der Kontrollpunkte mit Genauigkeitsangaben vor, wodurch eine zeitnahe Bewertung der stattgefundenen Bewegungen erfolgen kann. Um etwaige Fehlmessungen ausschließen zu können, werden alle Punkte zu einem späteren Zeitpunkt unter geänderter Satellitenkonstellation erneut aufgemessen. Die Erfahrungen der letzten Jahre haben gezeigt, dass die Lagedifferenz zwischen den beiden Messungen einer Epoche maximal 3 cm beträgt. Dieser Wert kann für den hier vorliegenden Anwendungsfall als ausreichend betrachtet werden, da die nachzuweisenden Bewegungen ein Vielfaches dessen betragen.

Ein weiterer Vorteil des Verfahrens RTK-GPS bietet die wirtschaftliche flächenhafte Erfassung ganzer Hänge. Durch die Ableitung digitaler Geländemodelle und den Vergleich mit vorangegangenen Messungen lassen sich detailliertere Aussagen über die Fließzonen eines jeweiligen Rutschhanges treffen.

4. Zusammenfassung

Der vorliegende Beitrag stellt einige ausgewählte Messverfahren eines umfangreichen Messprogramms vor, welches von Studenten der TU Dresden während eines Ingenieurvermessungspraktikums an der Staumauer Schräh (Schweiz) bearbeitet wird. Hierbei werden im besonderen auf Möglichkeiten eingegangen, die beiden offenen Enden einer Nivellementslinie durch die vorgestellten Verfahren der Seespiegelfixierung bzw. des Talübergangsnivellements zu stützen. Es konnte gezeigt werden, dass unter Nutzung der ruhenden Oberfläche eines stehenden Gewässers eine Höhenübertragung über dieses mit einer sehr hohen Genauigkeit möglich ist. Ein ebenfalls durchgeführtes Talübergangsnivellement konnte dieses Genauigkeitspotential nicht erreichen, da hier trotz gegenseitig gleichzeitiger Beobachtung unterschiedliche Refraktionsbedingungen auf den beiden Uferseiten die Genauigkeit des Ergebnisses limitieren. Außerdem konnte gezeigt werden, dass RTK-GPS ein praktisches und wirtschaftliches Verfahren zur Beobachtung von Punktbewegungen der an den See angrenzenden Rutschhanggebiete darstellt.

Literatur

DRODOFSKY, M. (1960): *Stromübergangsnivellement mit dem Zeiß-Nivellier Ni2*.
Zeitschrift für Vermessungswesen, 85. Jahrg., S. 227 - 235

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