

Rückblick auf 15 Jahre Überwachungsmessungen im Wägital

Ein Beitrag von MARITA SCHELLER, MICHAEL MÖSER und GUNNAR LELLE-NEUMANN

Seit ca. 45 Jahren wird die Stauanlage Schräh im Wägital während eines zweiwöchigen Vermessungspraktikums von Studierenden verschiedener Hochschulen überwacht. Die Staumauer wurde im Jahr 1924 fertiggestellt und ist Bestandteil eines zweistufigen Pumpspeicherwasserkraftwerks. Der Betreiber der Anlage ist die AG Kraftwerk Wägital, welche für die routinemäßigen Überwachungen der gesamten Stauanlage zuständig ist. Im Rahmen der jährlich im September stattfindenden Praktika wird neben einer dreidimensionalen Netzmessung an der Staumauer Schräh und einem Präzisionsnivelement eine Vielzahl an Messverfahren, insbesondere zur Höhenübertragung an der Mauer und über den See, angewendet. Weiterhin werden die Rutschhänge im gesamten Wägital überwacht. Im vorliegenden Beitrag liegt der Schwerpunkt auf dem Vergleich verschiedener Messverfahren. Es werden die Ergebnisse der letzten 15 Jahre vorgestellt und diskutiert.

Autoren

Dr.-Ing. Marita Scheller,
Prof. Dr. Michael Möser und
Dipl.-Ing. Gunnar Lelle-
Neumann sind am
Geodätischen Institut der
TU Dresden beschäftigt.

marita.scheller@tu-dresden.de

Überwachungsmessung | Staumauer Schräh | Wägital | Rutschhang | Höhenübertragung | Nivellement

1 Einleitung

Die Überwachung von Stauanlagen ist ein wichtiger Aspekt, wenn deren Stand- und Funktions-sicherheit nachhaltig beurteilt werden soll. Im Rahmen von Vermessungspraktika an der Stauanlage Schräh und im gesamten Wägital wird es Studierenden verschiedener Hochschulen seit ca. 45 Jahren ermöglicht, eine Vielzahl an Messverfahren zur Überwachung von Absperrbauwerken anzuwenden. Die Kooperation mit dem Betreiber der Anlage, der AG Kraftwerk Wägital (AKW), begann in den 1970er Jahren durch die Fachhochschule (FH) Frankfurt am Main (Schuhr 2009). Seit den 1990er Jahren ist die Professur Ingenieurgeodäsie der Technischen Universität Dresden (TUD) an den Überwachungsmessungen beteiligt. Seit dem Ausscheiden der FH Frankfurt am Main wurden die Messungen im Wägital von der Professur Ingenieurgeodäsie fortgesetzt. Die Überwachungsmessungen an der Staumauer Schräh sind Teil des Wahlmoduls »Deformationsanalyse« der Professur Ingenieurgeodäsie der TUD. Seit 2015 ist die Hochschule für angewandte Wissenschaften Würzburg-Schweinfurt (FHWS) an den Messungen im Wägital beteiligt. In diesem Beitrag werden die Ergebnisse aus 15 Jahren Überwachungsmessungen (2004 bis 2018) im Wägital vorgestellt, da für diesen Zeitraum konsistente Aufnahmen und Auswertungen aller Daten vorliegen. Ziel des Beitrags

ist weniger die Beurteilung der Stabilität der Stauanlage Schräh, dies erfolgt anhand jährlicher Überwachungsmessungen durch den Betreiber, der Schwerpunkt liegt vielmehr in der Gegenüberstellung der Messergebnisse auf Basis verschiedener Messverfahren und deren erreichbarer Genauigkeiten.

2 Staumauer Schräh

Die Staumauer Schräh im Wägital war zur Bauzeit in den 1920er Jahren die größte Betonstaumauer der Welt (Rota 2010). Sie befindet sich im Kanton Schwyz (Innerthal, Schweiz) und ist mit dem Wägitalersee Bestandteil des zweistufigen Pumpspeicherwasserkraftwerks, welches durch die AKW betrieben wird und vordergründig der Stromerzeugung im Winter dient. Die im Jahr 1924 fertiggestellte Gewichtsstaumauer (Abb. 1) besitzt eine Kronenlänge von 150 m und ist vom Fundament bis zur Krone 110,5 m hoch, wovon sich 66 m über der Talsohle befinden. Das natürliche Einzugsgebiet des Stausees hat eine Größe von 42,7 km² sowie zusätzlich 40 km² aus den unterhalb liegenden Gebieten des Ausgleichsbeckens Rempfen, dessen Wasser mittels Pumpen in den See eingespeist wird. Der Wägitalersee ist ca. 5 km lang, maximal 1,2 km breit und besitzt bei einer maximalen Staukote von 900 m ü. M. (in der Schweiz Bezeichnung von Höhen über dem Meeresspiegel) ein

Abb. 1: Staumauer Schräh, links die Luftseite, rechts die Seeseite mit Blick auf die Mauer



Fotos: Marita Scheller (links), Thomas Heinrich (rechts)

Wasservolumen von 147,4 Mio. km³. Der Betriebswasserspiegel könnte bis auf 850 m ü. M. abgesenkt werden (AKW 1930). Aufgrund geologischer und landschaftlicher Gründe kann die Absenkung aber nur bis auf 880 m ü. M. erfolgen (Schmidt und Möser 2006). Ausgeprägte Rutschungen von bis zu mehreren Metern pro Jahr gab es schon vor der Anstauung. Der jährliche Wechsel des Wasserstandes von bis zu 20 m hat zusätzlich einen großen Einfluss auf die Hangbewegungen. Regelmäßige Überwachungsmessungen im gesamten Wägital sind daher unerlässlich.

3 Messmethoden

Die Überwachung der Stabilität der Staumauer erfolgt primär durch eine dreidimensionale Netzmessung zwischen Beobachtungspfeilern und Punkten auf der Mauerkrone sowie durch ein Präzisionsnivellement. Die jährlichen Kontrollmessungen an den Rutschhängen werden mittels Real Time Kinematik (RTK) durchgeführt. [Abb. 2](#) gibt einen Überblick über das gesamte Messgebiet mit der Staumauer im Norden und dem Hauptrutschungsgebiet im Südwesten (Allmeind) sowie weiteren Gebieten in Rot, welche bezüglich der Rutschungen überwacht werden. Weiterhin sind alle wichtigen Anschlusspunkte zur Verbindung der Ergebnisse verschiedener Messverfahren in der Karte eingetragen.

Die Seeuferstraße verläuft auf 12 km Länge um den gesamten See, wobei rechts von der Mauer eine Straße durch einen Tunnel ins nördlich und talabwärts gelegene Vorderthal führt. Das Präzisionsnivellement ([Abb. 2](#), grün) erfolgt entlang der Uferstraßen links und rechts bis ca. 2 km Entfernung zur Mauer, westlich über den Höhenbolzen M84 bis zum Sägewerk (SW) und östlich über den Höhenbolzen K1 bis zum Sennegg (SE) sowie entlang der Fahrstraße durch den Tunnel bis zum Mauerfuß mit Anschluss an Punkt 51. Dabei ergeben sich drei offene Nivellementsenden (SW, SE und 51). Die Nivellementslinien werden streng nach den Vorgaben eines Präzisionsnivellements gemessen, sodass eine Standardabweichung für 1 km Doppelnivellement von 0,4 mm bis 0,8 mm erreicht wird. Ausführliche Erläuterungen zum Präzisionsnivellement geben Möser et al. (2012), Möser (2016) und Scheller et al. (2018a). Die freie Netzausgleichung der Höhenmessungen (Kap. 4) zeigt, dass die Genauigkeitsmaße von der Netzmitte zu den offenen Netzenden abnehmen, sodass Punktsetzungen bzw. -hebungen erst bei größeren Beträgen durch eine Deformationsanalyse aufgedeckt werden können. Die Herausforderung besteht darin, die drei offenen Enden der Nivellementslinien zu schließen, um eine verlässliche Deformationsanalyse über mehrere Jahre (Epochen) durchführen zu können. An der Mauer erfolgt dies durch drei Verfahren: trigonometrische Höhenübertragung, vertikale Distanzmessung und hängendes Messband ([Abb. 2](#): 51 und K1, blaue Linie). Der Höhenanschluss aller in [Abb. 3](#)

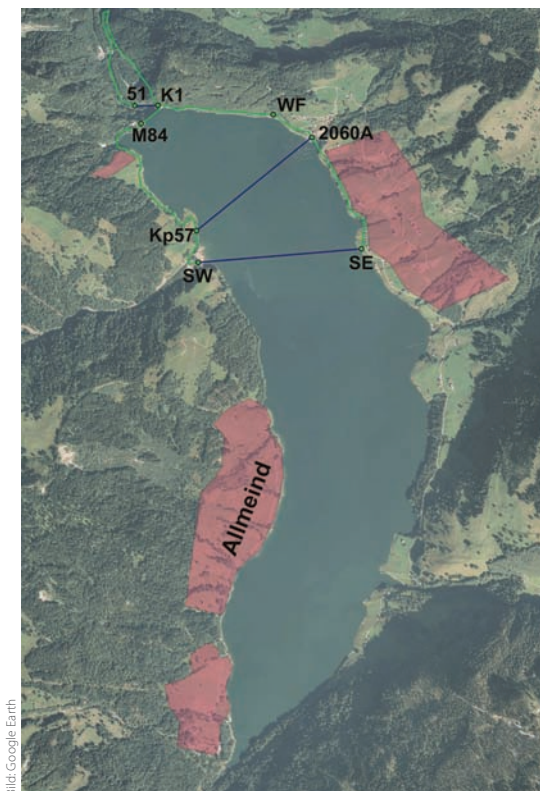
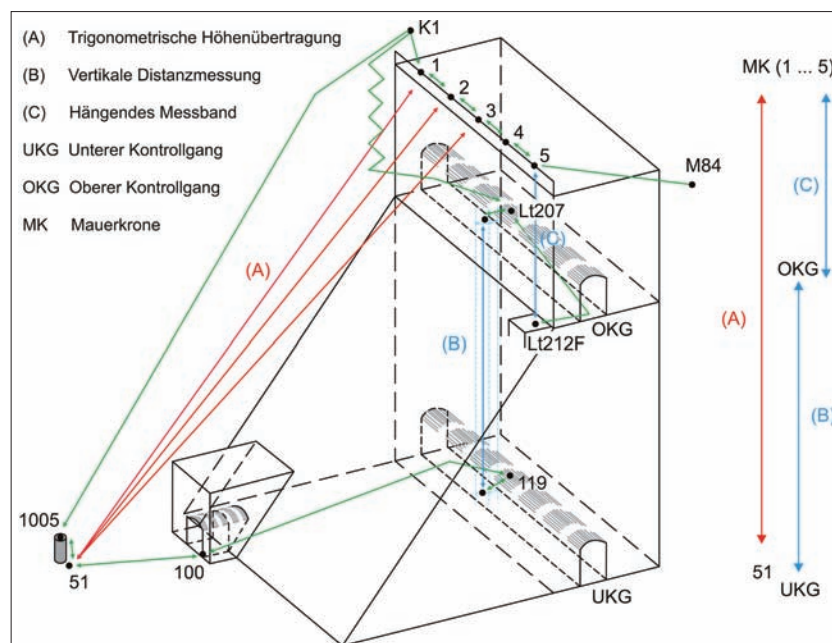


Abb. 2: Überblick Wägital mit der Staumauer Schräh im Norden, den Nivellementslinien in Grün, dem Hauptrutschungsgebiet Allmeind im Südwesten, weiteren Rutschungsgebieten in Rot und allen wichtigen Messpunkten

dargestellten und benannten Festpunkte erfolgt durch Präzisionsnivellement (grün).

An den beiden offenen Enden der Seeuferstraßen ([Abb. 2](#): SW und SE, blaue Linie) kommen vier Verfahren zum Einsatz: trigonometrische Höhenübertragung, Seespiegelfixierung, Talübergangsnivellement und Global Navigation Satellite System (GNSS). Obwohl vor allem die Verfahren Seespiegelfixierung und Talübergangsnivellement eine dem Präzisionsnivellement äquivalente Genauigkeit erreichen, werden hier ausschließlich die Ergebnisse der GNSS-Messungen vorgestellt. Für vertiefende Informationen bezüglich der Seespiegelfixierung und des Talübergangsnivellements sei auf Schmidt und Möser (2006) verwiesen. Ne-

Abb. 3: Messverfahren zur Höhenübertragung an der Staumauer Schräh; in Grün Anschluss aller markierten Punkte durch Präzisionsnivellement



ben den offenen Nivellementsenden SE und SW werden die Nivellementspunkte Kp57 und 2060A (Abb. 2: Kp57 und 2060A, blaue Linie) durch zusätzliche Messungen über den See miteinander verbunden und tragen somit ebenfalls zur Stabilisierung der Netzkonfiguration bei. Im Folgenden sollen die angewendeten Messverfahren kurz vorgestellt werden. Für weitere Erläuterungen und ausführliche Fehlerbetrachtungen wird auf die Literatur von Bauer (2018), Möser et al. (2012) und Heunecke et al. (2013) verwiesen.

Trigonometrische Höhenübertragung

Die trigonometrische Höhenübertragung ist ein Verfahren zur Bestimmung von großen Höhenunterschieden, basierend auf der Strecken- und Winkelmessung mittels Tachymetrie. Dabei sind als Korrekturen die Einflüsse von Refraktion und Erdkrümmung zu berechnen. Durch gegenseitige und gleichzeitige Beobachtung (Abb. 4, rot) können der Einfluss der Erdkrümmung eliminiert und der Einfluss der Refraktion minimiert werden. Für einen Höhenunterschied im Wägital wurden mindestens zehn Satzmessungen durchgeführt, sodass je nach Entfernung eine Genauigkeit von 1 bis 4 mm erreicht werden kann. Der trigonometrisch bestimmte Höhenunterschied Δh wird mit Berücksichtigung der Instrumentenhöhe i und der Reflektorhöhe z sowie der Messelemente Zenitwinkel ζ und Schrägdistanz s nach folgender Formel berechnet:

$$\Delta h = \frac{1}{2} s \cdot [(\cos_A - \cos_B)] + (i_A - i_B) + (z_A - z_B)$$

Trotz gleichzeitiger Beobachtung bleibt neben der Genauigkeit der Zenitwinkelmessung die Refraktion der größte Fehlereinfluss, insbesondere zwischen Mauerfuß und Mauerkrone, da hier starke Luftturbulenzen stattfinden. An der Mauer wird,

ausgehend von den Mauerpunkten 1 bis 3, jeweils eine trigonometrische Höhenübertragung zum Pfeiler 1005 durchgeführt und damit eine Höhe von ca. 68 m überwunden.

Vertikale Distanzmessung

Ein Lotschacht der Staumauer Schräh besitzt auf jeder Ebene in den Kontrollgängen eine Konsole. Die Konsolen sind mit einer Vorrichtung für Dreifuß und Geräteträger ausgestattet. Nach Aufsetzen der Geräteträger werden diese streng nach den Vorgaben eines Präzisionsnivelements eingemessen mit Bezug zum nächstgelegenen Festpunkt. Im unteren Kontrollgang (UKG) ist dies der Punkt 119 und im oberen Kontrollgang (OKG) der Punkt Lt207 (Abb. 4, blau). Nach Aufsetzen des Tachymeters im UKG wird vertikal auf das darüber befindliche Prisma mehrfach eine Distanzmessung durchgeführt. Um Fehler aufgrund von Phasenininhomogenitäten zu eliminieren, erfolgt die Messung in vier horizontalen Lagen: 0 gon, 100 gon, 200 gon und 300 gon. Weiterhin wird die Messung mit zwei verschiedenen Tachymetern, unter Verwendung des gleichen Reflektors, durchgeführt: 2004 bis 2018 mit der Leica-Totalstation (LTS) TCA2003, bis 2014 mit der LTS TC2002 sowie seit 2015 mit der LTS TS50. Zwischen dem OKG und dem UKG wird bei einem Höhenunterschied von ca. 56 m eine Genauigkeit < 0,5 mm erreicht.

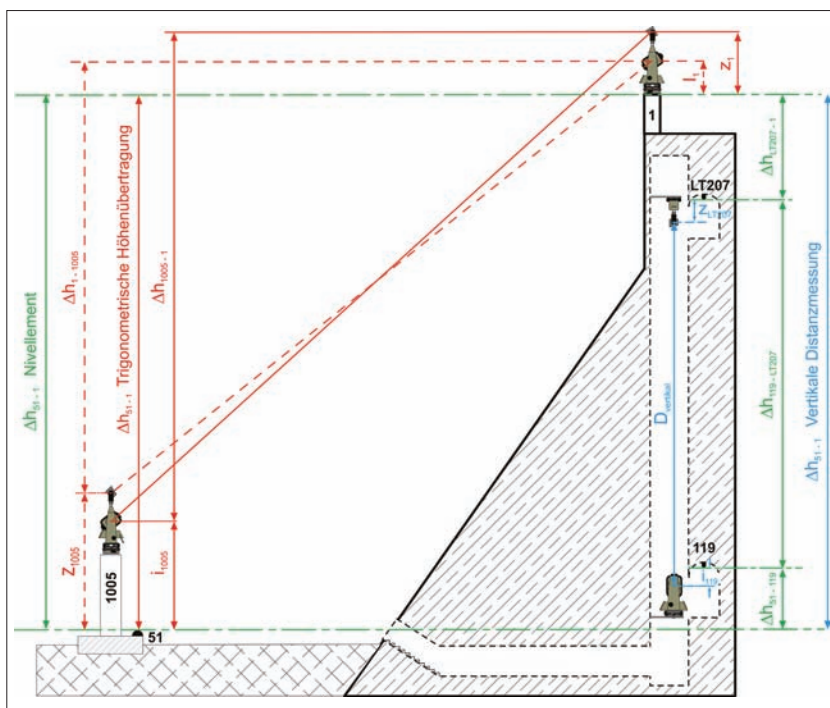
Hängendes Messband

Das hängende Messband ist eine weitere Methode der vertikalen Höhenübertragung sowohl im Innen- als auch im Außenraum. An der Staumauer Schräh wird das Verfahren zwischen dem Punkt 5 auf der Mauerkrone (MK) und dem Festpunkt Lt212F auf der Höhe des OKG angewendet und damit eine Höhe von ca. 13 m überwunden. Die Messung erfolgt mit zwei Stahlmessbändern, welche mit einem Gewicht versehen werden, sodass eine definierte Zugspannung realisiert wird. Während der gleichzeitigen Ablesung oben (MK) und unten (OKG) wird zusätzlich die Bandtemperatur erfasst, sodass der entsprechende Korrekturterm berechnet werden kann. Zur Höhenübertragung kommt das analoge Nivellier Ni002 zum Einsatz. Gemessen wird in zwei Kompensatorlagen im Hin- und Rückweg, sodass sich pro Messung vier Höhenunterschiede ergeben. Die Messungen werden pro Messband mit zwei verschiedenen Gewichten jeweils dreimal durchgeführt, korrigiert und gemittelt. Es ist eine Genauigkeit < 0,5 mm erreichbar.

GNSS – Global Navigation Satellite System

Weitere moderne Methoden zur Höhenübertragung, insbesondere über große Distanzen, sind differenzielle Verfahren unter Nutzung von GNSS, insbesondere wenn dabei geodätische GNSS-Empfänger zum Einsatz kommen. Im Wägital wurden gleichzeitig an vier Messpunkten jeweils Daten für einen Zeitraum von zwei Stun-

Abb. 4: Schematische Darstellung der verschiedenen Messverfahren zur Höhenübertragung an der Staumauer Schräh



den aufgezeichnet. Die GNSS-Beobachtungen dienen der Höhenübertragung über den See, um die zwei offenen Nivellementsenden an den Punkten SW und SE zu schließen und das Höhenetz zusätzlich über die beiden Punkte Kp57 und 2060A zu stabilisieren (blaue Linien in Abb. 2). Die Aufzeichnungsrate betrug 15 Sekunden, wobei trotz Abschattung durch die Berge Signale von 10 bis 16 Satelliten gleichzeitig empfangen werden konnten. Der Höhenanschluss an die jeweiligen Höhenbolzen wurde über Präzisionsnivellement realisiert (Scheller et al. 2018b). Die Auswertung der GNSS-Messungen erfolgte jeweils zwischen zwei gleichzeitig messenden GNSS-Empfängern und lieferte dreidimensionale Koordinatenunterschiede, das heißt unter anderem auch den Höhenunterschied zwischen den beiden Punkten. Diese sogenannte Basislinienauswertung erfolgte mit dem Programm Wa2 im Postprocessing, das heißt im Innendienst nach Abschluss der Messungen. Die erreichbare Genauigkeit liegt dabei je nach Beobachtungsdauer und Umgebungsbedingungen im Bereich bis zu wenigen Millimetern. Die Höhengenaugigkeit ist damit zwar nicht äquivalent der Genauigkeit eines Präzisionsnivellements, kann aber mit entsprechender Gewichtung dennoch zur Stabilisierung des Höhenetzes beitragen. Weiterhin liegt die Stärke des GNSS darin, mit reduziertem personellem Aufwand

große Höhenunterschiede ohne Sichtverbindung zu überbrücken und damit die Überwachungsmessungen konsistent auf das gesamte Wägital auszuweiten.

RTK – Real Time Kinematik

Das Verfahren RTK ist eine spezielle Anwendung des GNSS. Der große Unterschied zur klassischen, statischen Punktbestimmung mittels GNSS liegt darin, dass die Messpunkte nur für wenige Sekunden besetzt werden. Voraussetzung ist eine sogenannte Referenzstation (permanent messender GNSS-Empfänger), die über eine Kommunikationsverbindung (z. B. Funk- oder GSM-Verbindung) kontinuierlich Beobachtungs- und Korrekturdaten an den RTK-Rover liefert, sodass die Koordinaten der Messpunkte in Echtzeit auf wenige Zentimeter genau berechnet werden können. Eine nachträgliche Auswertung im Innendienst kann entfallen. Im Wägital wird südlich des Punktes SE eine Referenzstation so eingerichtet, dass eine Funkverbindung im gesamten Tal sichergestellt ist. Die Punkte werden zu Kontrollzwecken pro Messepoche zweimal in unabhängigen Sessions besetzt. Punktbewegungen, die teilweise bis zu mehrere Meter pro Jahr betragen können, ergeben sich aus den Koordinatendifferenzen zwischen den Messepochen. Die Verfahrensgenauigkeit liegt bei wenigen Zentimetern.

WORKSHOP & Live-Demonstration

EINLADUNG ZUM 21.08.19

zusammen mit



Wir zeigen zwei autonome Fahrzeuge der Firma L3 Technologies (C-Cat 3 und C-Worker 5), die mit einem Teledyne SeaBat T50-R, SBG Apogee INS, Teledyne Marine LIDAR und Teledyne Odom E20 ausgestattet sind.

Neben den Live Demonstrationen werden Präsentationen rund um den Einsatz von autonomen Fahrzeugen in der Hydrographie gehalten. Zudem wird L3 Technologies einen Einblick und Ausblick in ihre Entwicklungen geben.

Datum

21.08.2019 (9:00 bis 16:00)

Veranstaltungsort

HafenCity Universität
(Überseeallee 16, 20457 Hamburg)

MacArtney
UNDERWATER TECHNOLOGY

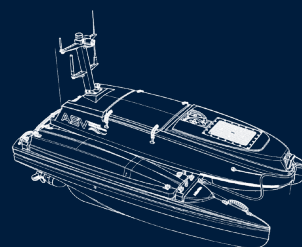
Anmeldung

Bitte melden Sie sich rechtzeitig an, da nur eine bestimmte Anzahl an Personen an der Veranstaltung teilnehmen kann!

☎ 0431-535500-70

@ mac_de@macartney.com

🌐 <https://www.macartney.de>



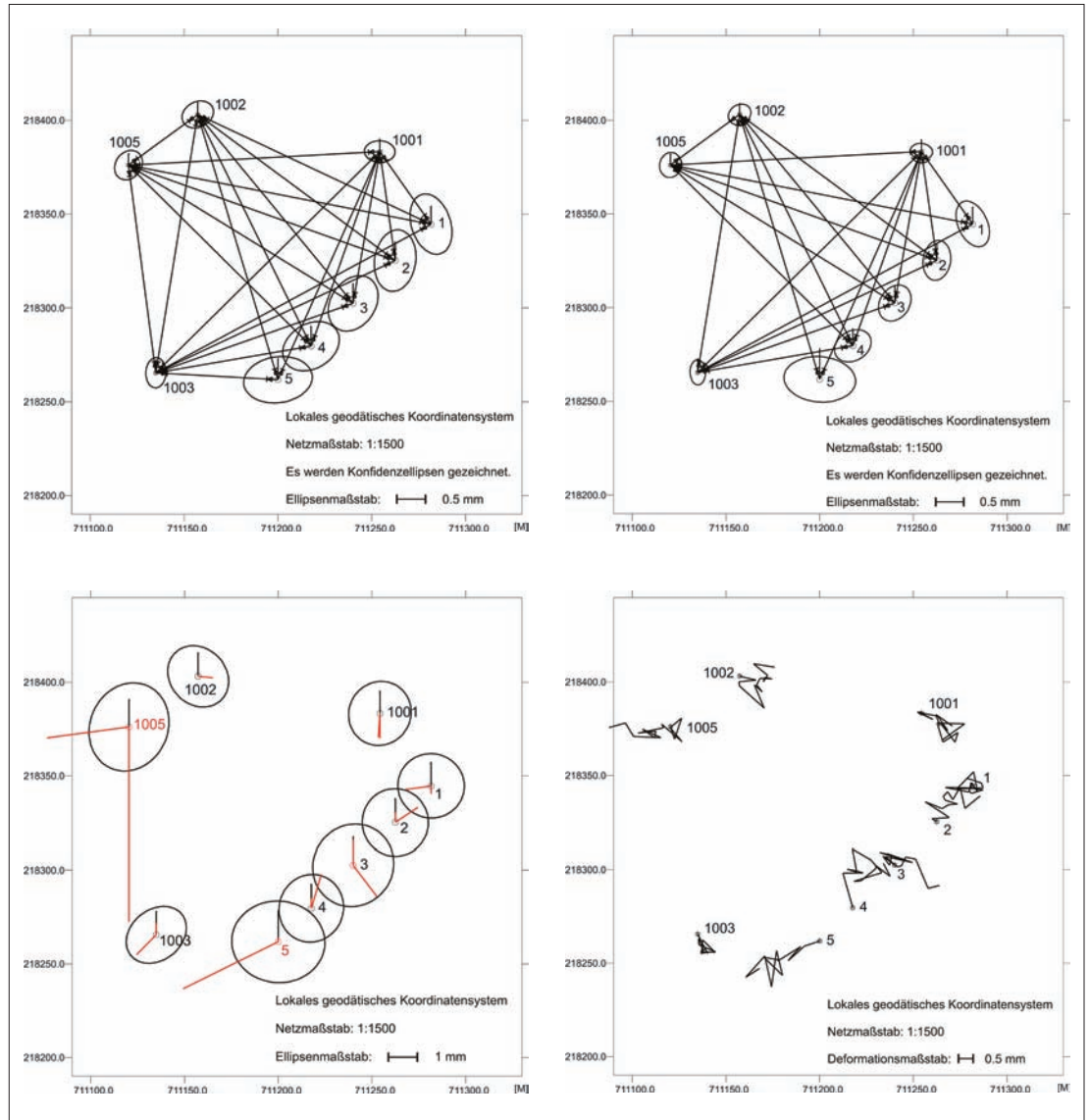


Abb. 5: Ergebnisse der freien Netzausgleichung für das Jahr 2004 (links oben) und für das Jahr 2018 (rechts oben); unten links Ergebnis der Deformationsanalyse zwischen den Jahren 2004 und 2018 aufgeteilt in Lage- und Höhenkomponente; unten rechts Ergebnis der sukzessiven Deformationsanalyse für die Lagekomponente von 2004 bis 2018

Die vorgestellten Verfahren zur Höhenübertragung finden nicht einheitlich in einem Bezugssystem statt (Scheller et al. 2018a). Zur Verknüpfung von Höhenunterschieden in verschiedenen Bezugssystemen sind Reduktionen und Korrekturen mit Kenntnis des Schwerfeldes erforderlich (Torge 2003). Da in diesem Beitrag aber nicht die Ergebnisse als Absolutwerte im Vordergrund stehen, sondern deren Änderungen über die Zeit, kann auf die Umrechnung in ein einheitliches Bezugssystem verzichtet werden. Für eine präzise Deformationsanalyse war es hingegen von entscheidender Bedeutung, dass in den aufeinanderfolgenden Messepochen möglichst gleiche Messbedingungen herrschten sowie die Messkonfigurationen und Berechnungen der relativen Höhen stets identisch realisiert wurden.

4 Ergebnisse

Dreidimensionale Netzmessung

Die dreidimensionale Netzmessung an der Stau-mauer Schräh wird seit 2004 mit dem TCA2003 realisiert (Schmidt und Möser 2009). Das Überwachungsnetz besteht aus vier Beobachtungspfeilern (1001, 1002, 1003 und 1005) sowie fünf Objekt-

punkten (1 bis 5) auf der Mauerkrone (Abb. 5). Die Messung erfolgte als kombiniertes Richtungs- und Streckennetz mit je drei Vollsätzen pro Standpunkt und Messung zu allen sichtbaren Netzpunkten. Die Auswertung wurde als freie Netzausgleichung mit Teilspurminimierung über die vier Pfeilerpunkte mit dem Programmsystem Panda der Firma GeoTech durchgeführt. Neben der Erfassung der atmosphärischen Parameter an Stand- und Zielpunkt, womit eine Korrektur für die Streckenmessungen berechnet werden kann, wird während der Ausgleichung ein Refraktionskoeffizient mitgeschätzt. Die Genauigkeiten der Richtungen und Zenitwinkel σ_r und σ_z sind für den genannten Zeitraum $< 0,5$ mgon und die der Strecken σ_s $0,5$ mm $\pm 0,5$ ppm. Abb. 5 stellt beispielhaft die Ergebnisse für die Jahre 2004 (links oben) und 2018 (rechts oben) grafisch dar. Aufgrund starker Refraktions-einflüsse wurden in der Auswertung die Beobachtungen zwischen den Punkten auf der Mauerkrone gestrichen. Sowohl die Genauigkeitsmaße der Punktkoordinaten als auch die Konfidenzellipsen aller Punkte liegen unter einem Millimeter. Lediglich der Punkt 5 weist eine größere Unsicherheit auf. Eine Ursache liegt in der Netzkonfiguration.

Der Punkt 5 kann nur von zwei Pfeilerpunkten aus beobachtet werden, 1001 und 1002. Die Schnittkonfiguration ist ungünstig, was sich in der großen Konfidenzellipse im Ergebnis der Ausgleichungen widerspiegelt. Eine weitere Beobachtung könnte zur Stabilisierung der Netzkonfiguration beitragen, es sind aber keine Sichten zu den Punkten 1003 oder 1005 gegeben.

In Abb. 5, unten links ist das Ergebnis der Deformationsanalyse (DA) von 2004 bis 2018 dargestellt. Hier ist in der Lagekomponente eine Tendenz des Punktes 5 entlang der Mauerkrone in Richtung Südwesten erkennbar, die Höhenkomponente ist stabil. Die sukzessive DA zwischen den Jahren 2004 und 2018 lässt erkennen, dass der Punkt 5 die Verschiebung in den ersten Jahren durchläuft und in den letzten Jahren keine signifikante Bewegung mehr aufzeigt (Abb. 5, unten rechts). Die Verschiebungsvektoren verlaufen eher zufällig in alle Richtungen und liegen im Genauigkeitsbereich der Netzauswertung. Eine Ursache kann darin gefunden werden, dass die Punkte auf der Mauerkrone nicht direkt mit der eigentlichen Mauer verbunden sind und später aufgesetzt wurden. Jeder Punkt befindet sich auf einem separaten Brüstungsglied. Es ist anzunehmen, dass das Brüstungsglied des Punktes 5, unabhängig von der Mauer, eine Bewegungstendenz besitzt, die nicht gefahrenanzeigend ist. Liegt der Fokus auf der Mauerbewegung zwischen See- und Luftseite, besitzen die Punkte auf der Mauerkrone in der Mitte der Mauer eine größere Variabilität als am Mauerrand, was auf das schwankende Wasservolumen des Sees zurückzuführen ist. Entscheidend ist, dass die Punkte keine gemeinsame Tendenz in Richtung Luft- oder Wasserseite aufzeigen und die Differenzen zwischen den Messepochen im Genauigkeitsniveau der Netzmessung liegen. Damit gibt es für die Jahre 2004 bis 2018 keine nachweisliche Deformation an der Staumauer Schräh. Dies gilt analog für die Höhenkomponente, welche keine signifikante Deformation für die letzten 15 Jahre aufzeigt.

Die Pfeilerpunkte 1001 bis 1003 können als stabil betrachtet werden. Der Punkt 1005 zeigt Verschiebungen sowohl in der Höhe als auch in der Lage (Abb. 5, unten). Der Pfeiler hat sich in den letzten 15 Jahren um bis zu 7 mm gesetzt und in Richtung Westen um 2 bis 3 mm verschoben. Dieser Effekt wird auch bei den verschiedenen Verfahren der Höhenübertragung an der Mauer im späteren Verlauf dieses Kapitels sichtbar. Der Pfeiler steht auf einer betonierten Grundplatte, die nur im Erdreich des Talbodens gegründet ist. Er ist also nicht, wie die anderen Sicherungspfeiler, im anstehenden Fels verankert. In der Netzauswertung wäre es sinnvoll, den Pfeilerpunkt 1005 nicht als Datumspunkt, sondern als Netzpunkt in die Ausgleichung einfließen zu lassen. Da für die Auswertung der dreidimensionalen Netzmessung aber nur vier Pfeilerpunkte zur Verfügung stehen, wird auch der Punkt 1005 weiterhin ein datumsgebender Punkt sein.

Präzisionsnivellement

Die Auswertung des gesamten Präzisionsnivellements, bestehend aus mehreren aneinander gereihten Nivellementsziügen, erfolgte als eindimensionales Netz im Programmsystem Panda. Der Datumspunkt der freien Netzausgleichung liegt nahe der Wasserfassung (WF, Abb. 2). Im Mittel über den gesamten Zeitraum wurde eine Standardabweichung für 1 km Doppelnivellement von 0,5 mm erreicht. Da die Genauigkeit der Netzauswertung von der Mitte des Netzes zu den offenen Netzenden abnimmt, liegen die Standardabweichungen der Höhen der Endpunkte (SW, SE und 51) bei 0,6 mm bis 0,8 mm.

Die anschließende Deformationsanalyse (2004 bis 2018), dargestellt in Abb. 6 (S. 12), zeigt das Ergebnis ohne Anschluss an den Mauerfuß, da erst ab 2009 ein nivellitischer Anschluss entlang der talabwärtsführenden Straße bis zum Punkt 51 erfolgte. Die roten Balken sind die Genauigkeitsmaße der Deformationsanalyse und die blauen Balken die Verschiebebeträge der einzelnen Punkte. Die Punkte westlich des Sees in Richtung SW weisen Bewegungsraten im Zentimeterbereich auf. Die Höhenänderungen sind auf Bewegungen der umliegenden Hänge zurückzuführen. Im Bereich westlich der Mauer werden zudem auch RTK-Messungen durchgeführt (Abb. 2), welche die Bewegungsbeträge bestätigen (nicht dargestellt). Auf dem ersten Kilometer nordöstlich der Mauer sind alle Punkte im Fels gegründet. Das gilt ebenso für die Anschlusspunkte K1 und M84 (Abb. 2 und Abb. 3). Hier liegt eine große Stabilität der Netzpunkte vor. Weiterhin weisen alle Punkte, welche an Absperrbauwerken entlang der Seeuferstraße installiert sind, eine hohe Stabilität auf. Dies ist in der kleinen Grafik in Abb. 6 erkennbar. Die Punkte 1 bis 5 auf der Mauerkrone zeigen Deformationen, das heißt die Verschiebebeträge (blau) sind größer als die Genauigkeitsmaße (rot), wohingegen die Punkte des OKG (Lt203 bis Lt211), welche direkt mit der Mauer verbunden sind, keine signifikanten Veränderungen über die letzten 15 Jahre aufweisen. Ausgehend vom Punkt 2056 bis zum SE (östlich des Sees) liegen die Bewegungsraten der Höhenbolzen im Bereich von wenigen Zentimetern. Diese Punkte sind nicht auf Fels gegründet, sondern auf einem Betonsockel geschützt in einem Schacht unterhalb der Erdoberfläche verankert. Auch diese Verschiebungen sind auf Bewegungen der Hänge in Seeufernähe zurückzuführen.

Höhenübertragung an der Mauer

Im Folgenden werden die Ergebnisse verschiedener Verfahren zur Höhenübertragung an der Mauer miteinander verglichen. Da im Zuge der Auswertung der dreidimensionalen Netzmessung der Punkt 1005 Deformationen von mehreren Millimetern in der Höhe aufwies, ist vor allem die Höhenänderung des Punktes 51, welcher auf der Grundplatte des Pfeilers 1005 verankert ist, von In-

Literatur

- AKW (1930): Das Kraftwerk Wägital. Bericht der Bauleitung; Verlag A.-G. Kraftwerk Wägital, Siebnen (Schweiz)
- Bauer, Manfred (2018): Vermessung und Ortung mit Satelliten: Globales Navigationssatellitensystem (GNSS) und andere satellitengestützte Navigationssysteme, 7. Auflage; Wichmann, Heidelberg
- Heunecke, Otto; Heiner Kuhlmann; Walter Welsch; Andreas Eichhorn; Hans Neuner (2013): Handbuch Ingenieurgeodäsie: Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen, 2. Auflage; Wichmann, Berlin/Offenbach
- Kunstmann, Jerome (2019): Bestimmung lokaler Geoidprofile im Wägital (Innerthal, Schweiz); Masterarbeit, TU Dresden, unveröffentlicht
- Möser, Michael; Helmut Hoffmeister, Gerhard Müller; Harald Schlemmer, Rudolf Staiger, Lambert Wanninger (2012): Handbuch Ingenieurgeodäsie: Grundlagen, 4. Auflage, Wichmann, Berlin/Offenbach
- Möser, Michael (2016): Handbuch Ingenieurgeodäsie: Ingenieurbau, 2. Auflage, Wichmann, Berlin/Offenbach
- Rota, Aldo (2010): Das Kraftwerk Wägital in Kunstbauten im Wägital; TEC21, 37/2010, Band 136, S. 22-28
- Scheller, Marita; Michael Möser; Gunnar Lelle-Neumann (2018a): Bestimmung von Lotabweichungen zur Kombination von GNSS, Trigonometrischer Höhenübertragung und Präzisionsnivellement im Bereich Wägitalsee (Talsperre Schräh, Schweiz); Wissenschaftliche Berichte der Hochschule Mittweida, Workshop: »Messtechnische Überwachung von Stauanlagen«, Nr. 1, 2018, S. 25-32
- Scheller, Marita; Michal Möser; Gunnar Lelle-Neumann (2018b): Überwachung der vertikalen Stabilität der Stauanlage Schräh im Wägital; Wasserwirtschaft, 10/2018, S. 19-24
- Schmidt, Jan ; Michael Möser (2006): Rutschungsbeobachtungen und Höhenübertragung an der Talsperre Schräh (Schweiz); Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule Mittweida (FH), Workshop: »Messtechnische Überwachung von Stauanlagen«, Nr. 1, 2006, S. 89-98
- Schmidt, Jan; Michael Möser (2009): Deformationsanalyse für eine Staumauer in einem zweistufigen Überwachungsnetz; Schriftenreihe des Instituts für Markscheidewesen und Geodäsie der TU Freiberg, Heft 2009 – 1: »10. Geokinematischer Tag«, S. 70-78
- Schurr, Peter (2009): Rückblick auf das Studium des Vermessungswesens anlässlich des 100-jährigen Jubiläums des Fachbereichs 1 der Fachhochschule Frankfurt am Main; Mitteilungen der DVW-Landesvereine Hessen e.V. und Thüringen e.V., Heft 1, 2009, S. 9-13
- Torge, Wolfgang (2003): Geodäsie; de Gruyter, Berlin/New York

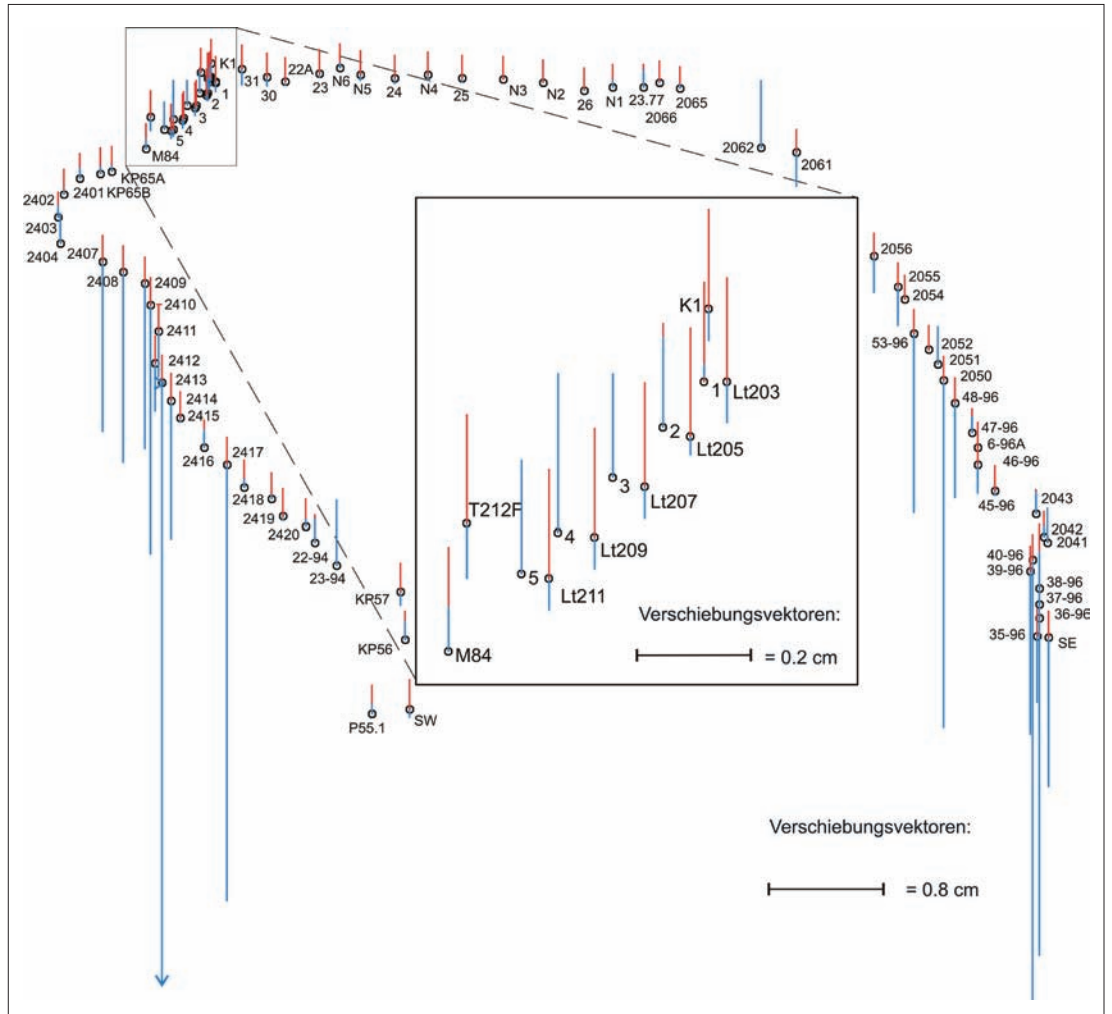


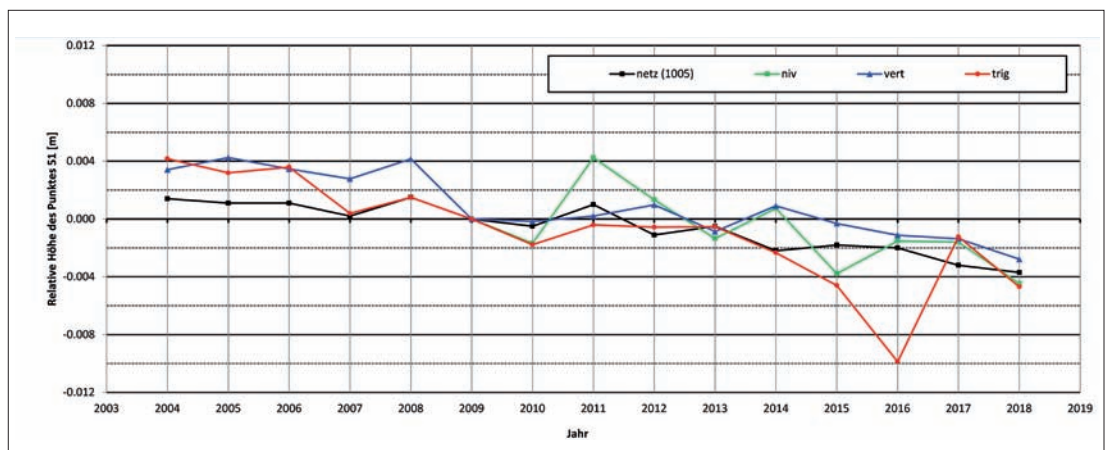
Abb. 6: Ergebnis der Deformationsanalyse des Präzisionsnivelements zwischen 2004 und 2018 mit den Genauigkeitsmaßen in Rot und den Verschiebeträgen in Blau

teresse. [Abb. 7](#) stellt die Ergebnisse des Präzisionsnivelements (grün) denen der trigonometrischen Höhenübertragung (rot) und der vertikalen Distanzmessung (blau) gegenüber.

Der Anschluss zwischen Mauerkrone (1 bis 5) zum Punkt 51 am Mauerfuß wurde erst ab dem Jahr 2009 nivellistisch durchgeführt, sodass die Höhenänderungen aller drei Verfahren auf das Jahr 2009 reduziert wurden. Die trigonometrische Höhenübertragung erfolgte von mindestens zwei, teilweise von drei Mauerpunkten jeweils zu Punkt 1005. Da die Höhenänderung des Punktes 51 betrachtet wird, müssen die Instrumentenhöhe i und die Reflektorhöhe z im Höhenunterschied

berücksichtigt werden ([Abb. 4](#) und Gleichung auf S. 8). Weiterhin werden die trigonometrischen Höhenunterschiede zwischen den jeweiligen Mauerpunkten zu Punkt 51 gemittelt. Die Standardabweichung liegt in der Größenordnung von 1 bis 3 mm. Das Ergebnis der vertikalen Distanzmessung wird mit zwei Höhenunterschieden aus dem Präzisionsnivelement kombiniert, um den Anschluss an die Punkte 51 (über Lt207 im UKG) und 1 (über 119 im OKG) zu gewährleisten. Mit Berücksichtigung der Verfahrensgenauigkeiten von 0,5 mm bis 4 mm zeigen alle drei Kurven einen ähnlichen Verlauf. Der maximale Höhenunterschied zwischen 2009 und 2018 ergibt sich aus

Abb. 7: Gegenüberstellung der Ergebnisse der Höhenübertragung an der Mauer, wobei die relativen Höhen auf das Jahr 2009 reduziert wurden, und in Schwarz die relative Höhe des Punktes 1005 als Ergebnis der 3D-Netzmessung



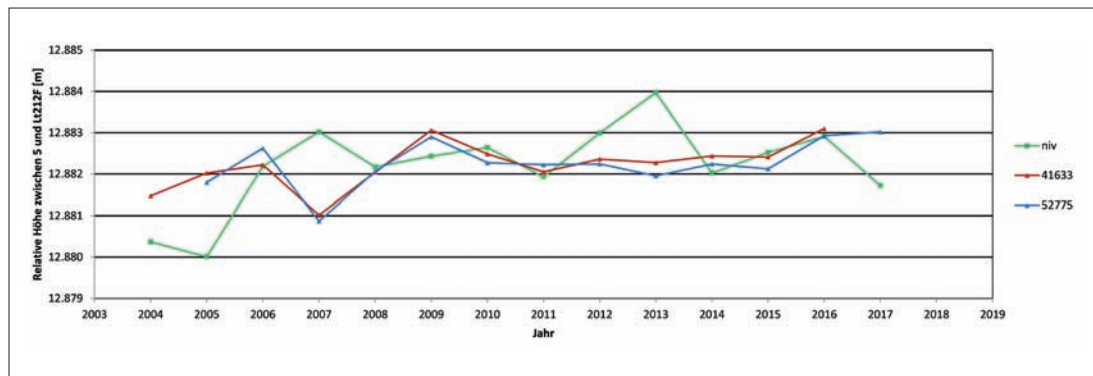


Abb. 8: Gegenüberstellung der relativen Höhe aus dem Präzisionsnivellement (in Grün) und der Messung mit hängendem Messband (in Rot und in Blau) zwischen den Punkten 5 auf der Mauerkrone und Lt212F auf Höhe des OKG

dem Nivellement mit -3 mm, aus der vertikalen Distanzmessung mit -4 mm und aus der trigonometrischen Höhenübertragung mit -5 mm und stimmt damit sehr gut überein. Sowohl die grüne als auch die rote Kurve lassen jeweils einen Ausreißer erkennen. Der Ausreißer der grünen Kurve im Jahr 2011 ist auf mindestens eine Fehlmessung im Bereich des talabwärtsführenden Nivellementsuges zurückzuführen. Der Ausreißer der roten Kurve im Jahr 2016 geht auf eine fehlerhafte Bedienung eines Instrumentes zurück.

Interessant ist der Ergebnisvergleich aller drei Verfahren der Höhenübertragung mit dem ausgeglichenen Ergebnis der dreidimensionalen Netzmessung. In Abb. 7 stellt die schwarze Kurve die Höhenänderung des Punktes 1005 dar. Eine Reduktion auf den Punkt 51 war hier nicht möglich, da der Höhenunterschied zwischen 1005 und 51 zum Zeitpunkt der Netzmessung unbekannt war. Mit der Annahme, dass die Verschiebung in der Höhe des Pfeilerpunktes 1005 nicht unabhängig von der vertikalen Bewegung der Grundplatte mit Punkt 51 ist, kann ein Vergleich aller vier Kurven erfolgen. Auch die schwarze Kurve zeigt einen den Verfahren der Höhenübertragung äquivalenten Verlauf. Die maximale Höhenänderung zwischen 2009 und 2018 liegt bei -4 mm und passt damit sehr gut zu den Ergebnissen der drei Verfahren zur Höhenübertragung. Damit wird gezeigt, dass mit Anwendung aller vier Verfahren die Deformation des Punktes 51 (1005) detektiert werden kann. Die Standardabweichung der vier Höhenänderungen über den Zeitraum 2009 bis 2018 liegt bei 1 mm.

In Abb. 8 ist das Ergebnis der Höhenübertragung mittels hängendem Messband (rot und blau) sowie die relative Höhe aus dem Präzisionsnivellement (grün) zwischen dem Mauerpunkt 5 und dem Punkt Lt212F grafisch dargestellt. Die rote und die blaue Kurve der zwei verwendeten Mess-

bänder haben einen nahezu identischen Verlauf. Weiterhin weist der Höhenunterschied zwischen den beiden Festpunkten keine signifikante Veränderung mit der Zeit auf. Das Jahr 2007 ist demnach als Ausreißer zu deklarieren. Die grüne Kurve weicht sowohl 2005 als auch 2013 deutlich von den anderen beiden Kurven ab. Sowohl im Jahr 2005 als auch im Jahr 2013 ist von einer Fehlmessung im Nivellement auszugehen. Die Werte der übrigen Jahre zeigen hingegen eine große Übereinstimmung zwischen der Messung mit hängendem Messband und dem Präzisionsnivellement. Die maximalen Differenzen liegen im Bereich von einem Millimeter. Beide Verfahren besitzen eine Genauigkeit von 0,5 mm, womit die Differenz im Bereich der Verfahrensgenauigkeiten liegt. Das hängende Messband kann demnach eine Alternative zur klassischen Anwendung des Präzisionsnivellements sein.

GNSS – Höhenübertragung über den See

Die statischen GNSS-Messungen werden seit 2016 auf den vier Punkten SE, SW, Kp57 und 2060A (Abb. 2) mit einer Antennen-Empfänger-Kombination von Leica (GS15, GS14 und 2-mal GS12) durchgeführt. Der Schwerpunkt liegt dabei auf dem Höhenunterschied Δh zwischen den Punkten SE und SW sowie den Punkten Kp57 und 2060A. Die relativen Höhen wurden als Ergebnis der im Kapitel 3 erläuterten Basislinienauswertung erhalten. Da die Auswertung für jede Basislinie separat und die Beobachtungen teilweise zeitlich versetzt erfolgten, können die Dreiecksschlüsse (Schleifenschlussfehler) zwischen den Messpunkten zusätzlich Auskunft über die Genauigkeit der berechneten relativen Höhen geben. In Abb. 9 sind für alle drei Messepochen (2016 bis 2018) neben den relativen Höhen (schwarz) die Dreiecksschlüsse in Rot dargestellt. Die Dreiecksschlüsse aller drei

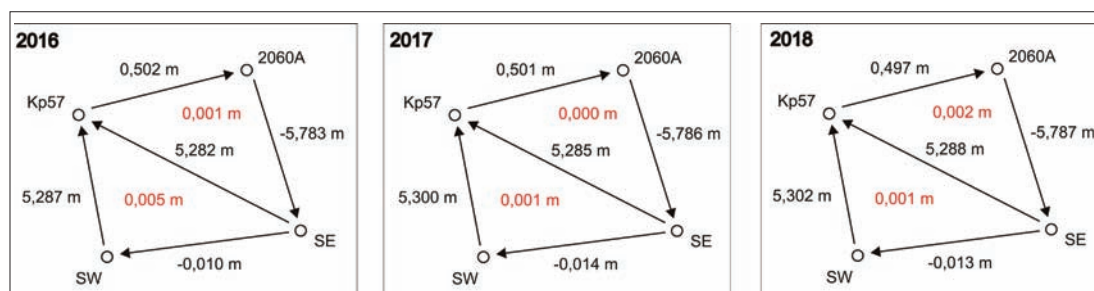


Abb. 9: Relative ellipsoidische Höhen der GNSS-Messungen als Ergebnis der Basislinienauswertung (in Schwarz) und die Dreiecksschlüsse (in Rot)

Tabelle 1: Ergebnis der relativen Höhenbestimmung über den See mittels GNSS zwischen den Punkten SE und SW sowie den Punkten Kp57 und 2060A, dargestellt sind ellipsoidische Höhenunterschiede und die Wiederholgenauigkeiten aus zwei unabhängigen Sessionen

Jahr	Δh [m] SE-SW	$\sigma_{\Delta h}$ [m] SE-SW	Δh [m] Kp57-2060A	$\sigma_{\Delta h}$ [m] Kp57-2060A
2016	-0,010	0,006	-0,502	-
2017	-0,014	0,003	-0,501	0,003
2018	-0,011	0,009	-0,497	-

Messeperioden liegen mit maximalen Werten von 0,005 m im Bereich des Genauigkeitsniveaus der GNSS-Messungen von einigen Millimetern.

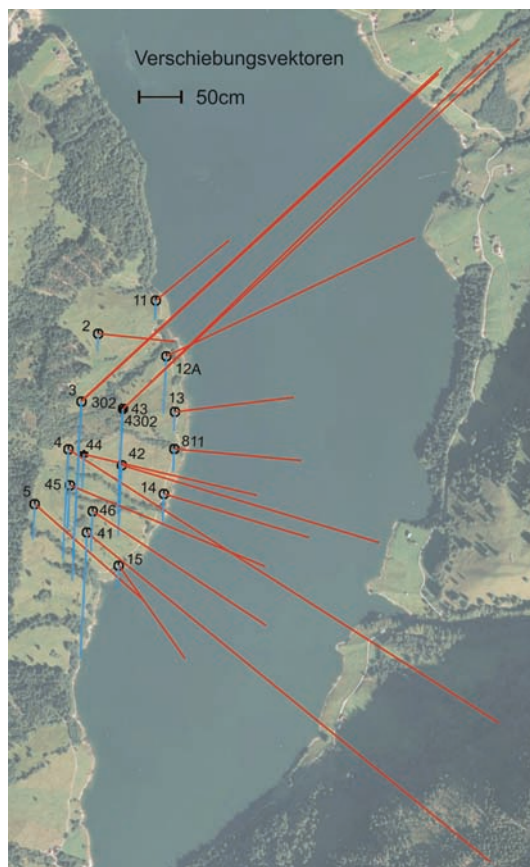
Tabelle 1 stellt die relativen Höhenunterschiede der Punkte SE und SW sowie der Punkte Kp57 und 2060A als einfaches arithmetisches Mittel zwischen zwei Sessionen und deren Wiederholgenauigkeit dar. Sowohl 2016 als auch 2018 konnten die Messungen auf dem Punkt Kp57 aufgrund von Messfehlern nicht zur Auswertung verwendet werden, sodass hier keine Wiederholgenauigkeit vorliegt. Nicht dargestellt sind die relativen Höhen zwischen den Punkten SE und 2060A, SE und Kp57, SW und 2060A sowie SW und Kp57. Die Wiederholgenauigkeiten für diese Höhenunterschiede liegen zwischen 0,002 m und 0,006 m. Im Mittel kann eine Standardabweichung von 0,004 mm angegeben werden, sie ist damit eine Größenordnung schlechter als die des Präzisionsnivelements. Hier ist zu diskutieren, inwieweit das Messverfahren GNSS zur Stabilisierung des Höhennetzes beitragen kann. Während der Messkampagne 2018 wurden im Rahmen einer Masterarbeit Messungen mit geodätischen Messausrüstungen (Trimble-Antennen und Leica-Empfänger) durchgeführt, welche gegenüber der bisher verwendeten Antennen-Empfänger-Kombinationen Vorteile be-

züglich der Abschirmung gegen die unerwünschten Mehrwegeeffekte haben. Weiterhin erfolgten die statischen Messungen mit einer Beobachtungsdauer von mindestens acht Stunden. Die Auswertung hat gezeigt, dass die relativen Höhen über eine Beobachtungsdauer von 2 h mit einer mittleren Standardabweichung von 5,2 mm und über eine Beobachtungsdauer von 8 h mit einer Standardabweichung von 2,2 mm bestimmt werden konnten (Kunstmann 2019). Folglich ist auch mit Höhenunterschieden auf Basis von GNSS-Messungen eine Stabilisierung des Höhennetzes möglich, insofern die relativen Höhen entsprechend in der Netzausgleichung gewichtet werden.

RTK-Messungen zur Beobachtung von Hangrutschungen

Im Folgenden werden die Ergebnisse der RTK-Messungen ausschließlich für den Hauptrutschungsbereich Allmeind (Abb. 2), welcher unbebaut ist, betrachtet. In Abb. 10 sind die Lageverschiebungen in Rot und die Veränderungen in der Höhe in Blau dargestellt. Tabelle 2 fasst die jährlichen dreidimensionalen Verschiebebeträge für die am stärksten verschobenen sechs Punkte im Bereich Allmeind (3, 4, 12A, 41, 42, 43) zusammen. Im Bereich Allmeind gibt es für den Zeitraum zwischen 2004 und 2018 maximale Verschiebungen von 6 m in der Lage (3, 4, 41 und 43) und 2 m in der Höhe (3 und 302), was einer mittleren Lageverschiebung von 0,4 m/a und einer mittleren Höhenverschiebung von 0,1 m/a entspricht. Die Lageverschiebungen folgen der Neigung des jeweiligen Hanges. Wie schon in Schmidt und Möser (2006) diskutiert, sind die Punktbewegungen im oberen Bereich des Hanges größer als im Bereich des direkten Seeufers. Damit liegt die primäre Ursache der ausgeprägten Punktbewegungen nicht an der jährlichen Füllstandsänderung des Sees um bis zu 20 m, sondern findet seine Ursache in starken Schneeschmelzen und Regenereignissen. Besonders starke Verschiebebeträge wurden zwischen September 2004 und September 2005 detektiert. In Rücksprache mit dem Betreiber der Anlage gab es im August 2005 besonders starke Regenfälle mit insgesamt 334,4 mm. In den anderen Untersuchungsgebieten (Abb. 2, rot) liegen die Verschiebungsvektoren im Bereich von wenigen Zentimetern. Im Gebiet des Ortes Innerthal konnten im Zeitraum 2004 bis 2018 keine signifikanten Hangbewegungen beobachtet werden.

Abb. 10: Verschiebungsvektoren über 15 Jahre (2004 bis 2018) der Lagekomponente in Rot und der Höhe in Blau im Bereich Allmeind auf Basis von RTK-Messungen



5 Zusammenfassung

Die Zusammenarbeit mit dem Betreiber der Anlage, der AG Kraftwerk Wägital, ermöglicht es, den Studierenden eine Vielzahl von Messverfahren an der Stauanlage Schräh im Innerthal (Schweiz) praktisch anzuwenden. Für sichere Aussagen bzgl. Deformationen wird vorausgesetzt, dass sich sowohl die Messkonfiguration als auch die Instrumente und der Beobachter möglichst nicht

Punkte	Start- und Endjahr													
	2004 2005	2005 2006	2006 2007	2007 2009*	2009 2010	2010 2011	2011 2012	2012 2013	2013 2014	2014 2015	2015 2016	2016 2017	2017 2018	
3	0,66	0,41	0,42	1,46	0,38	–	–	0,56	0,12	–	–	0,19	0,22	
4	1,56	0,66	0,35	1,06	0,35	0,40	0,28	0,32	0,08	–	–	0,22	0,15	
12A	0,60	0,45	0,11	0,62	0,14	0,18	0,14	–	–	–	–	–	0,13	
41	0,74	0,50	0,29	1,08	0,33	0,33	0,34	0,66	0,20	0,74	0,27	0,30	0,36	
42	0,50	0,31	0,15	0,55	0,17	0,19	0,17	0,26	0,07	0,26	0,14	0,14	0,15	
43	1,39	0,61	0,31	1,05	0,34	0,43	0,29	0,42	0,08	0,32	0,24	0,28	0,30	

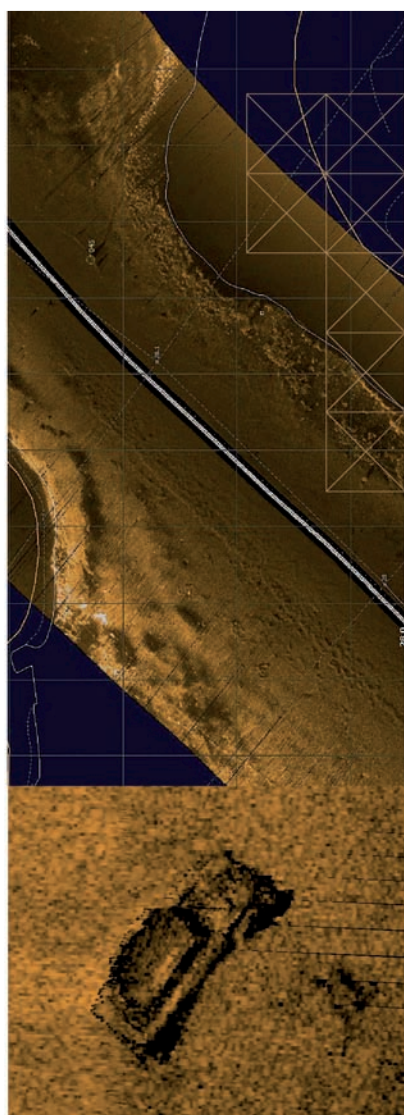
Tabelle 2: Dreidimensionale Verschiebungsvektoren in Metern pro Jahr für ausgewählte Punkte am Rutschhang Allmeind auf Basis von RTK-Messungen (* Zweijahresperiode)

ändern. Der Beitrag zeigt, dass trotz jährlich wechselnder personeller Besetzung eine hohe Genauigkeit auf Basis verschiedener Verfahren erreicht werden kann. Der Vergleich von vier Verfahren zur Höhenübertragung an der Mauer ergab Standardabweichungen besser einem Millimeter. Weiterhin lassen die Messungen und Deformationsanalysen, insbesondere des dreidimensionalen Netzes und des Präzisionsnivelements, der letzten 15 Jahre erkennen, dass die Stauanlage Schräh für den Zeitraum 2004 bis 2018 als stabil eingestuft werden kann. Die Überwachungsmessungen der Studenten sind dabei nur ein Zusatz zu den jährlich seit Baubeginn in unterschiedlicher Intensität durchgeführten Überwachungsmessungen durch den Betreiber. Von großem Inter-

esse sind dabei auch die RTK-Messungen an den Rutschhängen, welche für ausgewählte Punkte im Bereich Allmeind bis zu 0,5 m/a (dreidimensionale Verschiebungsvektoren) betragen können. Im bewohnten Bereich Innerthal konnten hingegen keine signifikanten Hangbewegungen beobachtet werden. //

Dank

Ein besonderer Dank geht an den Betreiber der Stauanlage Schräh, die AG Kraftwerk Wägital, hier insbesondere an den Ansprechpartner Herrn Alois Züger, ohne deren vertrauensvolle Zusammenarbeit eine Durchführung der jährlichen Vermessungspraktika nicht möglich wäre.



Sonar Mosaic

Kongsbergs neueste Software zum Mosaiken von Side-Scan-Daten in Echtzeit oder im Post Processing. Basierend auf unserer langen Erfahrung in der Hydrografie und bei militärischen Anwendungen (Minenjagd) wurde bei dieser Software großer Wert auf die einfache und intuitive Bedienung, sowie schnellste Datenverarbeitung gelegt. Dieses neue „Tool“ bietet dem Anwender eine schnelle Kartenerstellung und detaillierte Objektdarstellungen.

- Individuelle Ansichten mit georeferenzierter Karte, Wasserfall- und Objektdarstellung
- Import von Hintergrundkarte im ENC/IENC-S57 Standard und DXF-Format
- Direktes Einlesen von Kongsberg EA Echolot oder Kongsberg Pulsar Rohdaten, optional auch im XTF-Format
- Automatische Positionsinterpolation bei kurzzeitigem Ausfall des GNSS-Sensors (im Post Processing)
- Gesondertes Auswerten von Objekten mit Pos./Lage/Abmessungen und Sonarbild als XML-Report
- Speichern der georeferenzierten SONAR MOSAIC-Bilder als Geo-tiff.



KONGSBERG