

Erfahrungen im Gravimeterkalibriersystem Zugspitze

Thomas Peters, Martin Schmeer, Jakob Flury und Christian Ackermann

Zusammenfassung

In den Jahren 2004 und 2005 ist im Raum Garmisch-Partenkirchen–Wank–Zugspitze ein neues Kalibriersystem für Relativgravimeter eingerichtet worden. Dieses System zeichnet sich durch sehr große Schweredifferenzen von bis zu 528 mGal bei kurzen Transportzeiten aus und eignet sich sehr gut für die Kalibrierung von Scintrex-Gravimetern. In einer fast zweijährigen Zeitserie mit monatlichen Beobachtungen wurde das Kalibriersystem auf die typische Variabilität der absoluten Schwerewerte untersucht. Die beobachteten Variationen lassen sich zu einem Großteil geophysikalischen Vorgängen wie der gravitativen Anziehung durch Schnee zuordnen. Gleichzeitig wurde das Verhalten der verwendeten Relativgravimeter eingehend studiert. Die aus der Einrichtung des Kalibriersystems und der Analyse der Zeitreihe von Kalibriermessungen gewonnenen Erfahrungen sind dargestellt und diskutiert. Eine weitere Nutzung des Kalibriersystems wird angeregt.

Summary

In 2004 and 2005, a new calibration system for relative gravimeters has been established in the area of Garmisch-Partenkirchen–Wank–Zugspitze. The key advantage of this calibration system is the large gravity range of up to 528 mGal with short transport time allowing the highly accurate calibration of Scintrex relative gravity meters. Monthly calibration experiments have been carried out in a time series of almost two years to test the temporal variability of absolute gravity values. A large part of the observed variations can be assigned to gravitative effects of environmental mass changes (foremost snow). The time series was used for analyzing the characteristics of the used relative gravity meters. The attained experience from the establishment of this relative gravity meter calibrating system along with the analysis of the time series of calibrating experiments are described and discussed. A further utilization of the calibrating system is encouraged.

1 Einleitung

Die terrestrische Gravimetrie verwendet absolute und relative Verfahren zur Schweremessung. Erstere ergeben absolute Werte für die Schwerebeschleunigung, während letztere nur die Differenz zwischen zwei Punkten in instrumentenspezifischen Einheiten liefern. Um diese Messergebnisse in Schwereunterschiede umrechnen zu können, benötigt man eine Kalibrierfunktion bzw. im einfachsten Fall einen Kalibrierfaktor. Sie lassen sich aus

Kalibriermessungen zwischen Punkten mit bekannter absoluter Schwere ableiten.

Die für einen Kalibrierfaktor erreichbare Genauigkeit hängt wesentlich von der Schweredifferenz zwischen den Punkten mit absoluten Schwerewerten ab. Im Allgemeinen gilt: je größer die Schweredifferenz, umso höher die Genauigkeit der Kalibrierung. Schon sehr frühzeitig erkannte man, dass sich die Zugspitze aufgrund des großen Höhenunterschiedes und der Erschließung mittels Zahnradbahn und Seilbahn hervorragend als Kalibrierstrecke eignet. So wurde die Schweredifferenz von ca. 530 mGal zwischen dem Talort Garmisch und dem meteorologischen Turm auf dem Zugspitzgipfel bereits 1937 mit Pendelmessungen beobachtet (Weiken 1950). In späteren Jahren ab 1950 kam es zu Messungen mit verschiedenen Geräten, die in der Folge auch für Kalibrierungen verwendet wurden (vgl. z.B. Morelli 1951, Marzahn 1958).

Die Weiterentwicklung der Absolutgravimeter hin zu den modernen Freifallgeräten brachte eine Genauigkeitssteigerung von etwa zwei bis drei Größenordnungen mit sich. Diese Genauigkeit lässt sich mit heute verbreiteten Relativgravimetern wie den Geräten der Firma LaCoste-Romberg (LCR) oder den Gravimetern der Firma Scintrex (Autograv CG3 und CG5) nutzen. Insbesondere für letztere wurde daher in einer Zusammenarbeit zwischen dem Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie (IAPG, Technische Universität München), dem Institut für Erdmessung (IFE, Leibniz Universität Hannover) und dem Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG, Frankfurt/Main) in den Jahren 2004 und 2005 ein Kalibriersystem im Raum Garmisch-Partenkirchen eingerichtet (vgl. Timmen et al. 2006) und anschließend auf seine zeitliche Stabilität untersucht (Flury et al. 2007). Der Schwereunterschied in dem neuen Kalibriersystem ist wesentlich größer als beim Kalibriersystem Hannover (Kanngieser et al. 1983), dem bisher meistgenutzten Kalibriersystem in Deutschland. Dadurch eignet sich das neue Kalibriersystem besonders zur Bestimmung linearer Kalibrierfaktoren, die für moderne Relativgravimeter vom Typ Scintrex von maßgeblicher Bedeutung sind. Für die Absolutschweremessungen standen die Freifallgravimeter FG5-220 des IFE und das kleinere A10-002 des BKG, beide von der Firma Micro-g Solutions, zur Verfügung. Die folgenden Abschnitte bieten eine Übersicht zu den im Rahmen der Messkampagne gewonnenen Erfahrungen.

2 Entstehung des neuen Kalibriersystems Zugspitze

2.1 Auswahl geeigneter Beobachtungsorte

Die Messgenauigkeit der verwendeten Absolutgravimeter liegt bei $\pm 3 \mu\text{Gal}$ (FG5-220, Timmen et al. 2006) bzw. $5\text{--}10 \mu\text{Gal}$ (A10-002, Flury et al. 2007). Dies ist extrem hoch, wenn man bedenkt, dass $1 \mu\text{Gal}$ 10^{-8} m/s^2 entspricht und folglich die Messungen relativ zur Schwerebeschleunigung

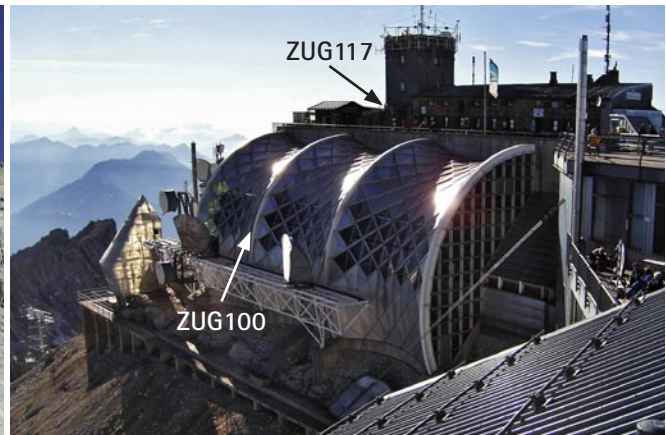


Abb. 1: Lage der Punkte ZUG100, ZUG117 und ZUG200

nigung mit Genauigkeiten von fast 10^{-9} erfolgen. Um dies voll nutzen zu können, sind hohe Anforderungen bei der Auswahl der Messpunkte zu berücksichtigen. Als wichtige Kriterien haben sich herausgestellt:

- Stabilität des Untergrunds: anstehender Fels oder Beton, keine Fliesen, Estrich, Linoleum o. ä. Testmessungen mit einem Relativgravimeter sind bei der Erkundung vorteilhaft.
- Langzeitstabilität des Untergrunds und der näheren Punktumgebung: keine Baumaßnahmen in der Nähe oder lokale Vertikalbewegungen zu erwarten.
- Geringe Massenveränderungen in der Umgebung: keine Wasser- oder Öltanks sowie Ausgleichsgewichte von Seilbahnen in der Nähe. Umweltbedingte Veränderungen in Grundwasser, Schnee, Eis und Atmosphäre gering oder anderweitig gut erfasst. Entsprechende Abschätzungen mit Modellen sind erforderlich, vgl. Abschnitt 3.
- Möglichst geringe Störungen durch Wind, Sonneneinstrahlung, Temperaturveränderungen über 24 Stunden usw. Daher ist eine Messung nur innerhalb von Gebäuden möglich.
- Ebene Fläche von ca. 1 m^2 für die Aufstellung des FG5, zusätzlich Platz für Computer und Zubehör.
- Praktische Aspekte: Gute Zugänglichkeit und Erreichbarkeit, kurze und für schwere Lasten von insgesamt 300 kg geeignete Transportwege zwischen den Punkten, Stromanschluss verfügbar, Übernachtungsmöglichkeit in der Nachbarschaft.

Neben der Berücksichtigung dieser Kriterien empfiehlt es sich, mehrere Punkte in der Nachbarschaft als Rückversicherung mit Relativgravimetern zu beobachten. Zur Absicherung gegen lokale Höhenänderungen ist eine Anbindung der Höhe an ein Festpunktfeld für spätere Wiederholungsmessungen von Interesse. Im Rahmen einer Erkundung sind schließlich geeignete Orte festgelegt worden, die die oben genannten Bedingungen möglichst weitgehend erfüllen. Abb. 1 gibt einen Eindruck von der Lage der Punkte und ihrem alpinen Charakter.



2.2 Ergebnisse der absoluten Schweremessungen

Beginnend im September 2004 sind die ersten Beobachtungen mit dem FG5 am Gipfel der Zugspitze (ZUG100) und in der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus (ZUG200) durchgeführt worden. In der Folge kamen weitere Messungen in der Gipfelstation der Wank-Seilbahn (WANK100), an der zugehörigen Talstation (WANK200) sowie mit dem A10 ein weiterer, leichter zugänglicher Punkt am Zugspitzgipfel (ZUG117) und ein Punkt an der Talstation der Eibsee-Seilbahn (ZUG301) hinzu. Die Messergebnisse sind in Tab. 1 zusammengestellt.

Tab. 1 enthält neben den Zahlenwerten für die einzelnen Referenzniveaus der verschiedenen Instrumente auch Angaben zur Beobachtungsdauer, den eingesetzten Instrumententypen sowie den genauen Schwerevertikalgradienten an den einzelnen Messpunkten. Die Gradienten stammen aus Beobachtungen mit Relativgravimetern in verschiedenen Höhenniveaus. Die Übertragung der Schwere von einem Referenzniveau zum anderen bringt zusätzlich zu den oben genannten Genauigkeiten weitere Fehlerbeiträge von bis zu $3 \mu\text{Gal}$ mit sich. Bemerkenswert ist der extreme Wert des Vertikalgradienten am Zugspitzgipfel von über $500 \mu\text{Gal/m}$ (im oberen Punkt ZUG117). Der Wert wird stark von der lokalen Massenverteilung in der unmittelbaren Umgebung des Punktes beeinflusst und wurde durch Modellierung der topographischen Massen bestätigt (Flury und Rummel 2009).

Fast alle Punkte wurden mehrfach mit Absolutgravimetern besetzt. Dabei zeigen sich deutlich unterschiedliche Werte zu unterschiedlichen Jahreszeiten. Die Dif-

Tab. 1: Ergebnisse der Absolutschweremessungen, vgl. Timmen et al. (2006) und Flury et al. (2007). Es sind jeweils Schwerewerte für drei Referenzniveaus angegeben: Scintrex-Niveau (0.260 m), A10-Niveau (0.705 m) und FG5-Niveau (1.200 m).

Punkt (Höhe) Vertikalgradient	Datum	Instr.	Dauer [h]	g [m/s ²] Scintrex-Niv.	g [m/s ²] A10-Niveau	g [m/s ²] FG5-Niveau
ZUG117 (2956 m)	2005/02/17	A10	1	9.80056179	9.80055946	9.80055688
-522.0 $\mu\text{Gal}/\text{m}$	2005/09/28	A10	0.3	9.80056146	9.80055914	9.80055656
ZUG100 (2941 m)	2004/09/18	FG5	24	9.80062587	9.80062380	9.80062149
-465.3 $\mu\text{Gal}/\text{m}$	2005/02/17	A10	1	9.80062613	9.80062406	9.80062176
	2005/09/28	A10	0.3	9.80062586	9.80062379	9.80062149
ZUG200 (2660 m)	2004/09/09	FG5	24	9.80155017	9.80154861	9.80154687
-350.5 $\mu\text{Gal}/\text{m}$	2005/02/17	A10	5	9.80155016	9.80154860	9.80154687
ZUG301 (994 m)	2005/07/20	A10	0.5	9.80524498	9.80524373	9.80524233
-282.0 $\mu\text{Gal}/\text{m}$	2005/09/28	A10	0.3	9.80524504	9.80524379	9.80524239
WANK100 (1738 m)	2004/12/01	FG5	24	9.80373710	9.80373537	9.80373346
-387.7 $\mu\text{Gal}/\text{m}$						
WANK200 (735 m)	2004/12/03	FG5	24	9.80584700	9.80584573	9.80584432
-284.7 $\mu\text{Gal}/\text{m}$	2005/02/19	A10	1	9.80584694	9.80584568	9.80584427
	2005/07/20	A10	0.3	9.80584702	9.80584575	9.80584435
	2005/09/27	A10	0.3	9.80584701	9.80584574	9.80584433

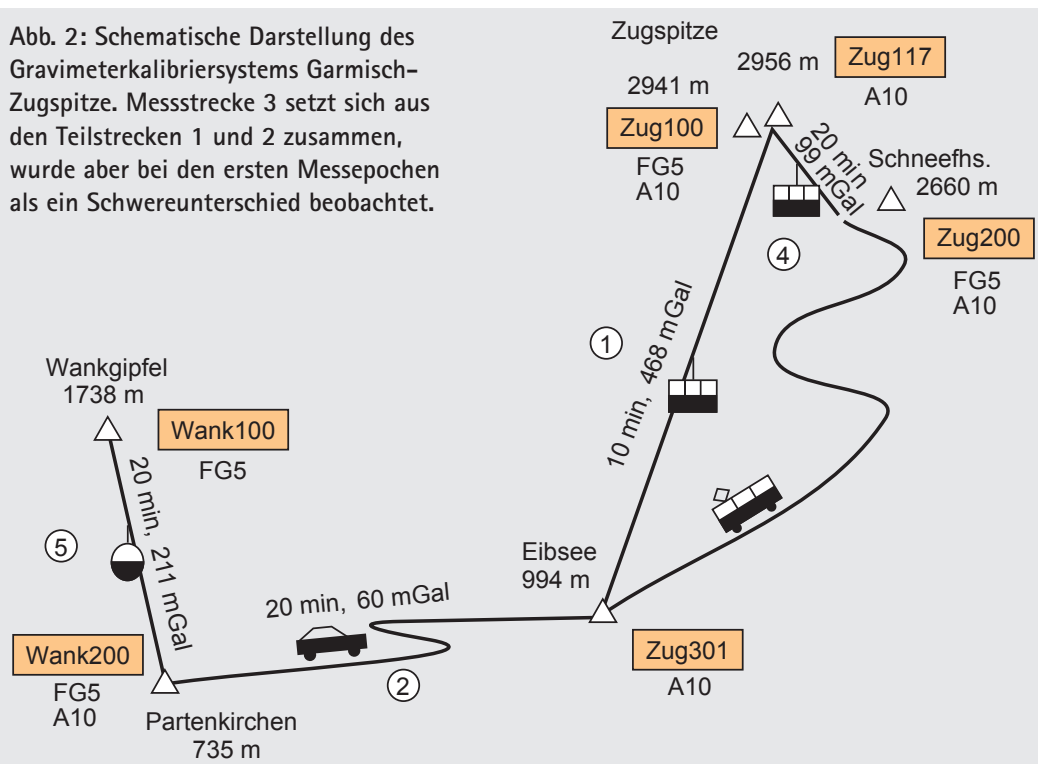
ferenzen von über 30 μGal am Zugspitzgipfel können zum Großteil auf die unterschiedliche Schneelage und die Anziehung der Schneemassen zurückgeführt werden, vgl. Abschnitt 4. Eine Kontrollmöglichkeit der langzeitigen Höhenstabilität besteht durch die präzise bestimmten Höhenunterschiede zwischen den Punkten. Jeder Punkt ist mittels Präzisionsnivellement an eine Höhenmarke angeschlossen. Zwischen einigen dieser Marken bestehen Verbindungen durch statische GPS-Beobachtungen über 72 Stunden zu den GPS-Permanentstationen des Instituts für Meteorologie und Klimaforschung in Garmisch sowie der SAPOS-Station auf dem Wank (Hackl 2005).

Insgesamt umfasst das Kalibriersystem seit dem vorläufigen Abschluss der absoluten Schweremessungen im September 2005 damit fünf Teilstrecken, die zur Kalibrierung miteinander kombiniert werden können. Abb. 2 gibt eine schematische Übersicht hierzu und

weist die Schweredifferenzen, ungefähren Transportzeiten und Transportarten aus.

Die größte Schweredifferenz besteht zwischen dem tiefsten und dem höchsten Punkt. Da die Transportart an der Talstation der Eibsee-Seilbahn wechselt, bietet sich die zusätzliche Messung von Punkt ZUG301 als Zwischenpunkt an. Abschnitt 4 geht näher auf die Auswirkung der Transportart im Rahmen von Kalibriermessungen ein. Als Gipfelpunkt bietet sich aufgrund der besseren Zugäng-

Abb. 2: Schematische Darstellung des Gravimeterkalibriersystems Garmisch-Zugspitze. Messstrecke 3 setzt sich aus den Teilstrecken 1 und 2 zusammen, wurde aber bei den ersten Messepochen als ein Schwereunterschied beobachtet.



lichkeit Punkt ZUG117 an, der wie die historischen Vorbilder im meteorologischen Turm des Münchner Hauses liegt. Aus Platzgründen ist dort keine Beobachtung mit dem FG5 möglich. Die FG5-Messung wurde daher auf ZUG100 in den Räumen der Deutschen Funkturm GmbH durchgeführt. Leider ist der Punkt ZUG200 im Schneefernerhaus seither durch Baumaßnahmen unzugänglich gemacht worden. Messungen zu den Versicherungspunkten und historischen Punkten dort sind nach wie vor möglich, erfordern wegen des nicht-öffentlichen Zugangs zum Schneefernerhaus jedoch etwas mehr logistischen Aufwand. Die Kalibrierstrecke am Wank weist mit 211 mGal zwar eine geringere Schweredifferenz auf, bietet aber den Vorteil der geringsten Fahrtkosten und liegt im eingehend untersuchten Schwerfeldtestnetz Estergebirge des IAPG (Flury 2002).

3 Zeitliche Variationen im Kalibriersystem

Unterschiede in den Schwerewerten zwischen den einzelnen Messepochen sind neben Messfehlern auf tatsächliche Schwereänderungen zurückzuführen, die auf den im fraglichen Zeitraum abgelaufenen Massenverlagerungen beruhen. Für die wichtigsten der im Bereich des Kalibriersystems erwarteten Variationen sind die Auswirkungen im Folgenden diskutiert.

Schneemassen

Die hochalpine Lage des Kalibriersystems bringt es mit sich, dass im Verlauf der Jahreszeiten große Variationen in den Schneemassen auftreten, die einen signifikanten Einfluss auf die Schweremessungen haben. Da nicht ausreichend viele Daten über Schneehöhen und Schneedichten in der Nähe der Messpunkte vorliegen, wurde die resultierende Schwerevariation aus einem im Projekt GLOWA-Danube erstellten Schneemodell (Mauser und Ludwig 2002) abgeleitet. Dieses Modell stellt für jeden Tag großräumig die Schneemassen in Form von äquivalenten Wasserhöhen in einem 1 km × 1 km-Gitter bereit.

Die Berechnung der Anziehung erfolgte durch Repräsentation der Modelldaten als Punktmassen auf einem digitalen Geländemodell (DGM) bis in 40 km Entfernung. Im Nahbereich wurden die Schneemassen auf ein hochauflösendes 50 m-DGM-Gitter des Landesamtes für Vermessung und Geoinformation (LVG) Bayern interpoliert. Auf diese Weise werden die Schneemassen mit der richtigen Geländehöhe berücksichtigt, auch wenn die grobe räumliche Auflösung des Schneemodells damit nicht verbessert werden kann. Ein Vergleich mit beobachteten Schneehöhen an der Wetterstation des DWD auf dem Zugspitzplatt zeigt jedoch eine recht gute Übereinstimmung.

Leider lagen die Daten des Schneemodells nicht für den Zeitraum der Beobachtungen vor. Die gravitative Anziehung der Schneemassen aus dem Schneemodell wurde daher als tägliche Zeitreihe für einen schneearmen

(1997/98) und einen schneereichen Winter (1998/99) berechnet, um die Bandbreite der möglichen Auswirkungen auf die Schweremessungen einzugrenzen. Die Ergebnisse werden in Abschnitt 4 den Beobachtungen gegenübergestellt.

Gletscherabschmelzung

Im Bereich der Zugspitze befindet sich der Großteil der Eismassen im Schneeferner. Er hat nach Beobachtungen des LVG Bayern in den vergangenen 40 Jahren durchschnittlich 1 m pro Jahr an Höhe verloren (Kistler et al. 2009) und dürfte in 40 bis 60 Jahren verschwunden sein. Die Auswirkungen auf den am nächsten liegenden Punkt im Schneefernerhaus (ZUG200) sind daher mit einem einfachen Modell abgeschätzt. Sie liegen bei 2–3 µGal pro Jahr. Für eine einjährige Messreihe ist dieser Effekt damit vernachlässigbar. Mit Blick auf die Langzeitstabilität kommt der Eisabschmelzung hingegen Bedeutung zu. Auch eine eventuelle Hebung des Felsuntergrundes nach dem Wegfall der Eisauflast wäre dann zu untersuchen.

Grundwasser

Das mit Sedimenten gefüllte Trogtal der Loisach verfügt über eine hohe Speicherkapazität für Wasser. Eine Abschätzung mithilfe eines Quadermodells zeigte, dass die größten Auswirkungen von Grundwasseränderungen auf die Schwere direkt im Bereich der Talfüllung auftreten und mit zunehmendem Abstand rasch abnehmen (Flury 2002). Da die Kalibrierpunkte nicht unmittelbar auf der Talfüllung liegen, werden nur geringe Auswirkungen auf die Schwere in diesen Punkten erwartet. Der stärkste Effekt dürfte in Punkt WANK200 auftreten; aber dort übersteigen die beobachteten Schwereänderungen ±10 µGal nicht. Leider gibt es in unmittelbarer Nähe der Kalibrierpunkte keine aktuellen Pegel oder andere Quellen für die Grundwasserstände.

Atmosphäre

Die Atmosphärenmasse beeinflusst den Schwerewert einerseits direkt und andererseits indirekt durch ihre Auflast auf der festen Erde. Die auftretenden Schwerevariationen können aus dem aktuellen Luftdruck relativ zu einer Standardatmosphäre über die hydrostatische Gleichung abgeleitet werden. Daraus folgt ein empirischer Gradient von ca. 0.3 µGal/hPa Luftdruckabweichung. Dies bedeutet, dass die üblicherweise auftretenden Luftdruckschwankungen deutlich im messbaren Bereich liegen. Die Schweremessungen wurden um diese Effekte korrigiert. Ob die Verwendung des empirischen Gradienten im betrachteten Gebiet mit stark ausgeprägter Topographie jedoch hinreichend genau ist, bedarf noch einer näheren Betrachtung. Ansätze für eine realistischere Modellierung sind z. B. in Peters (2007) erläutert. Neumeyer et al. (2004) zufolge sind Verbesserungen im Bereich von wenigen µGal zu erwarten.

Ausgleichsgewichte von Seilbahnen

Die Punkte am Wank und vor allem der am Eibsee (ZUG301) befinden sich innerhalb bzw. in unmittelbarer Nähe von Seilbahnstationen. In diesen befinden sich große bewegliche Massen von über 140 t Gewicht in Form der Zug- und Tragseilgewichte, deren Höhe um etwa 10 m verändert werden kann. Eine Abschätzung zeigt jedoch, dass dadurch an keinem Punkt Schwereänderungen von über 1 μGal zu erwarten sind. Zudem variiert die Höhe der Gewichte während einer Seilbahnfahrt um maximal 2 m. Einflüsse durch Vibrationen während des Seilbahnbetriebs wurden durch die Auswahl der Messpunkte gering gehalten.

4 Durchführung von Kalibriermessungen

4.1 Ergebnisse einer Zeitreihe von Kalibriermessungen

Das IAPG führte im Zeitraum von Oktober 2004 bis August 2006 an 28 Tagen (Messeperioden) Kalibriermessungen mit drei verschiedenen Scintrex-Gravimetern durch. Hauptsächlich kam das Instrument CG3-310218 (IAPG) zum Einsatz, dessen Genauigkeit und Langzeitstabilität damit eingehend untersucht werden konnte. Hinzu kamen zu einigen Messeperioden simultane Beobachtungen mit den Geräten CG3-303202 und CG5-44 (beide BKG). Zu jeder Epoche wurden 1 bis 3 Teilstrecken des Kalibriersystems (Abb. 2) gemessen. Die Messung einer Teilstrecke zu einer Messepoche wird im Folgenden als eine Kalibriermessung bezeichnet. Insgesamt wurden 61 Kalibriermessungen durchgeführt. Jede Kalibriermessung beinhaltet die drei- bis neunmal hintereinander ausgeführte Messung der Verbindung über die betreffende Strecke.

Die Auswertung erfolgte in drei Schritten. Zunächst wurde für jede einzelne Kalibriermessung aus den Scintrex-Beobachtungen ein – ggf. nichtlinearer – Driftverlauf bestimmt und ein unkalibrierter bzw. mit einem a priori Faktor kalibrierter Schwereunterschied geschätzt. Für die meisten Teilstrecken und Epochen ergaben sich daraus Fehlerstandardabweichungen für die Schwereunterschiede im Bereich von 1 bis 6 μGal (Schmeer 2006). Bei Teilstrecke 2 kam es zu größeren Fehlerstandardabweichungen im Bereich von 10–20 μGal . Daran sind verstärkte Hystereseeffekte insbesondere des CG3-Gravimeters beim Autotransport auf dieser Strecke beteiligt (siehe 4.3).

Im zweiten Schritt wurden fünf Kalibriermessungen des CG3-310218 aus vier Messeperioden gemeinsam mit simultanen oder nahezu simultanen Ergebnissen aus absoluten Messungen ausgeglichen. Die betreffenden Messeperioden erstrecken sich über 13 Monate. Ein zeitlich konstanter Kalibrierfaktor für das CG3 wurde als Parameter mitgeschätzt. Da mehrere Epochen verwendet wurden, musste ein Ansatz gewählt werden, der die so-

wohl in den Absolutschwerewerten als auch in den Relativmessungen auftretenden Änderungen von Epoche zu Epoche berücksichtigt. Solche Änderungen können einerseits durch Massenänderungen wie die variable Schneebedeckung und andererseits durch instrumentelle Fehler und Instabilitäten verursacht sein. Es kann jedoch erwartet werden, dass die in der gleichzeitigen Messung verschiedener Geräte konsistent auftretenden Änderungen durch Massenänderungen verursacht sind. Daher wurden für jede Epoche zeitliche Änderungen der Schwerewerte bzw. Schwereunterschiede als weitere Parameter mitgeschätzt. Die Verbesserungen aus der Ausgleichung geben dann Inkonsistenzen zwischen den Messungen verschiedener Geräte wieder und damit vorwiegend instrumentelle Fehler, insbesondere auch eventuelle zeitliche Instabilitäten des Kalibrierfaktors.

Abb. 3 zeigt die Schweredifferenzen der Zeitreihe aus Absolut- und Relativmessungen (nach Anbringen des geschätzten Kalibrierfaktors) für alle Messeperioden und Teilstrecken. Die zur Kalibrierung gegenüber den Absolutmessungen verwendeten Epochen und Teilstrecken sind in der Grafik gelb hinterlegt. Die zeitlichen Änderungen der Schwereunterschiede – und damit auch die Wiederholbarkeit von Epoche zu Epoche – liegen für die Strecken 2, 4 und 5 innerhalb von $\pm 10 \mu\text{Gal}$. Messungen auf den Strecken 1 und 3, die den Gipfel der Zugspitze einschließen, sind im Zeitraum Juli bis Dezember ebenfalls innerhalb von $\pm 10 \mu\text{Gal}$ annähernd konstant, weisen aber im Zeitraum Januar bis Juni eine signifikante jahreszeitliche Variation von bis zu 35 μGal auf. Die jahreszeitliche Variation wird vor allem durch die zahlreichen Relativmessungen gut erfasst. Für das Kalibriersystem bedeutet dies, dass die Kalibrierwerte nur im Zeitraum Juli bis Dezember als annähernd konstant angesehen werden dürfen. Die bereits erwähnten Verbesserungen für die relativen Messungen aus der Ausgleichung betragen in der Regel unter 5 μGal , ausnahmsweise bis 12 μGal . Für den ausgeglichenen Kalibrierfaktor des CG3-310218 wird eine exzellente Genauigkeit von $1.2 \cdot 10^{-5}$ erhalten. Die höhenmäßige Verteilung der Messpunkte über den gesamten Schwereunterschied des Kalibriersystems würde auch die Bestimmung eines quadratischen Kalibrierfaktors erlauben. Es wurde jedoch kein signifikanter quadratischer Faktor gefunden, d.h. es wurde keine signifikante Abweichung von einem linearen Gravimeterverhalten festgestellt.

Es muss darauf hingewiesen werden, dass der gewählte Ansatz eventuelle systematische Änderungen (Driften) des Kalibrierfaktors vernachlässigt. Unsere Zeitreihen zeigen keine signifikanten Trends, die auf eine solche Änderung hinweisen würden. Eine deutliche Drift des Kalibrierfaktors wurde von Budetta und Carbone (1997) für einen fabrikneuen CG3-Sensor beschrieben. Bei älteren Geräten – und alle im Kalibriersystem Zugspitze eingesetzten Geräte waren mehrere Jahre alt – sind Driften des Kalibrierfaktors über einen Zeitraum von ein bis zwei Jahren aber erfahrungsgemäß klein.

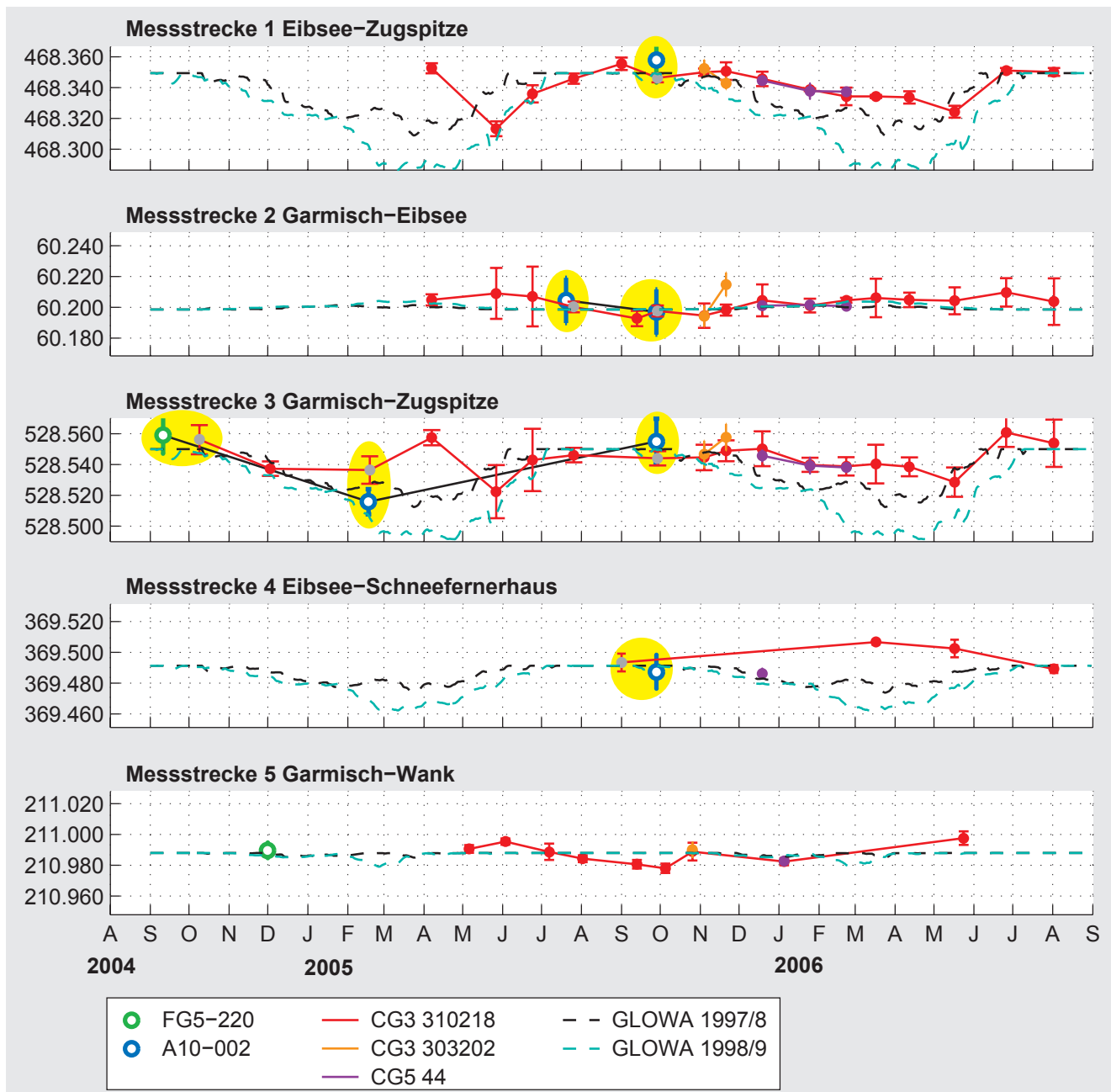


Abb. 3: Zeitreihen der Schwereunterschiede (in mGal) der fünf Teilstrecken mit Ergebnissen aus Absolut- und Relativgravimetrie überlagert mit der Anziehung durch Schneemassen aus GLOWA-Danube aus den Jahren 1997 bis 1999. Alle quasi-simultanen Absolut- und Relativmessungen sind gelb hinterlegt.

Für die Geräte CG3-303202 und CG5-44 lagen keine simultanen Absolutschweremessungen vor. Daher wurden für diese Geräte in einem dritten Schritt nach dem gleichen Ausgleichungsansatz Kalibrierfaktoren aus simultanen Messungen des CG3-310218 bestimmt. Die Kalibrierfaktoren dieser Geräte wurden ebenfalls für die gesamte Zeitreihe als konstant angesehen. Auch hier ergaben sich sehr kleine Residuen und eine exzellente Genauigkeit der Kalibrierfaktoren im Bereich von bis zu $2 \cdot 10^{-5}$ (Tab. 2).

Abb. 3 zeigt weiterhin die Modellierungsergebnisse aus dem GLOWA-Schneemodell. Da die Modellwerte sich nicht auf den gleichen Zeitraum wie die Messungen beziehen, ist nur ein grober Vergleich des typischen jahres-

zeitlichen Verlaufs möglich. Auf den Strecken 1 und 3 zeigen die Mess- und Modellergebnisse einen ähnlichen jahreszeitlichen Signalverlauf. Das jahreszeitliche Signal in den Messergebnissen ist wohl im Wesentlichen durch

Tab. 2: Kalibriergenauigkeiten von Scintrex-Relativgravimetern.

Instrument	Anzahl an Kalibriermessungen	Genauigkeit des Kalibrierfaktors
CG3-310218	5	$1.2 \cdot 10^{-5}$
CG3-303202	5	$2.0 \cdot 10^{-5}$
CG5-44	7	$1.4 \cdot 10^{-5}$

die variablen Schneemassen verursacht. Die Amplituden der jahreszeitlichen Variation sind allerdings für die Messungen deutlich geringer als für die Modellergebnisse. Aufgrund der Konsistenz der Messzeitreihe wird vermutet, dass diese Diskrepanz nicht auf Messfehler zurückzuführen ist, sondern möglicherweise Vereinfachungen bei der Schneemodellierung oder nicht modellierten Einflüssen zuzuschreiben ist. Für Messstrecke 4 ergibt sich keine Korrelation zwischen Messung und Modellergebnissen, allerdings ist hier der Vergleich aufgrund der geringen Anzahl von Messepochen nur bedingt aussagekräftig. Trotz der Diskrepanzen helfen die Modellergebnisse, grobe Abweichungen von einem konsistenten jahreszeitlichen Verlauf als Ausreißer in der Messreihe zu identifizieren – wie den Wert auf Teilstrecke 1 im April 2005. Es wird vermutet, dass bei diesem Wert Hystereseeffekte des CG3 erhöhte systematische Fehler bewirkt haben. Zu Beginn der Messreihe war die Aufstellzeit auf wenige Minuten pro Punkt begrenzt. Später wurde die Aufstelldauer auf bis zu 30 Minuten verlängert, um die Hystereseeffekte nach dem Transport besser abklingen zu lassen.

4.2 Beurteilung der Kalibrierungsergebnisse

Die aus der Kombination mehrerer Kalibriermessungen erzielte Kalibriergenauigkeit von $1\text{--}2 \cdot 10^{-5}$ zeigt das exzellente Potenzial des Kalibriersystems Zugspitze. In der Praxis wird allerdings häufig nur *eine* Kalibriermessung bzw. Messepoche vorliegen. Daher ist die Frage wichtig, welche Kalibriergenauigkeit aus einer einzelnen Kalibriermessung zu erwarten ist. Aus den oben diskutierten Verbesserungen aus der Ausgleichung und aus der Konsistenz der langen Zeitreihe schließen wir, dass die äußere Messgenauigkeit einzelner Kalibriermessungen auf den Teilstrecken des Kalibriersystems in aller Regel besser als $15 \mu\text{Gal}$ ist, mit Ausnahme des bereits erwähnten Ausreißers. Umgerechnet auf die Schweredifferenzen auf den Teilstrecken 1 und 3 von ca. 500 mGal bedeutet dies, dass mit einer eintägigen Kalibriermessung eine Kalibriergenauigkeit für ein Scintrex-Gravimeter von besser als $4 \cdot 10^{-5}$ erreicht werden kann. Diese Zahl schließt die Genauigkeit der Absolutgravimeterergebnisse und die Effekte typischer zeitlicher Instabilitäten mit ein, setzt allerdings voraus, dass die Kalibriermessung im Zeitraum relativ konstanter Kalibrierwerte (Juli bis Dezember) ausgeführt wird. Voraussetzung ist weiter, dass das Geräteverhalten des verwendeten Scintrex-Gravimeters gut bekannt ist (vgl. Hackney 2001, zu einem Gerät mit besonders starken Hystereseeffekten).

Timmen und Gitlein (2004) fanden in einer der bisher ausführlichsten Untersuchungen der Kalibriergenauigkeit von Scintrex-Gravimetern für einzelne Epochen ebenfalls Genauigkeiten im Bereich von 10^{-5} , erhielten aber Diskrepanzen von Epoche zu Epoche im Bereich von bis zu $\pm 1.5 \cdot 10^{-4}$ und konnten daher zeitliche Instabilitäten der Kalibrierfaktoren in dieser Größe nicht ausschließen.

Diese Ergebnisse wurden allerdings für Schwereunterschiede von nur etwa 100 mGal erhalten und können daher deutlich stärker durch Massenänderungen in der Punktumgebung und instrumentelle Fehler beeinflusst sein. Im Kalibriersystem Zugspitze wurden in unserer langen Messzeitreihe bei keinem der verwendeten Scintrex-Gravimeter Instabilitäten im Bereich von 10^{-4} festgestellt. Die deutlich höhere Genauigkeit und Stabilität der hier erhaltenen Kalibrierfaktoren ist einerseits auf die großen Schwereunterschiede zurückzuführen, die selbst bei im absoluten Sinn großen Messfehlern oder Umwelteffekten noch gute relative Kalibriergenauigkeiten erlauben. Andererseits beruhen sie auf dem schonenden und schnellen Transport der Geräte in den Seilbahnen, der eine hohe Redundanz von Beobachtungen innerhalb eines Mess-tages erlaubt.

4.3 Instrumentelle Fehlerquellen

Die Ergebnisse der Zeitreihe zeigen eine gute Stabilität der getesteten Scintrex-Gravimeter. Allerdings sind systematische Störeinflüsse durch verschiedene Effekte nicht auszuschließen, die bisher auf diesem Genauigkeitsniveau nicht ausreichend untersucht worden sind. Um zuverlässig Genauigkeiten im Bereich von 10^{-5} zu erreichen, sind weitere Arbeiten auf diesem Gebiet erforderlich.

Hysteresee

Alle Relativgravimetermessungen im Kalibriersystem Zugspitze waren nach einem Transport durch signifikante Hystereseeffekte gekennzeichnet. Messreihen zeigen ein sogenanntes »Nachlaufen« im Bereich von über $50 \mu\text{Gal/h}$. Durch die übliche Vorgehensweise bei der Präzisionsgravimetrie, »gleiche Handgriffe in gleicher Reihenfolge in gleichen Zeitabständen«, mitteln sich homogene Hystereseeffekte bei einer Differenzbildung heraus. Allerdings weisen die beobachteten kurzzeitigen Driften abweichend von Hackney (2001) gelegentlich ein inhomogenes Verhalten auf. Abb. 4 zeigt ungleichförmige Hystereseeffekte, die zu großen Fehlern führen können. Um die Messergebnisse nicht zu verschlechtern, ist es daher zweckmäßig, die Aufstellzeit so zu verlängern, dass ein Abklingen des Nachlaufens angenommen werden kann. Aufstellzeiten von mindestens 30 Minuten sind dafür erforderlich. Zusätzlich weist das »Nachlaufen« in den Einzelmessungen einer Aufstellung bei fast allen CG3-Messungen im Gegensatz zu Hackney (2001) eine Abnahme auf. Die Effekte sind bei CG5-Beobachtungen eine Größenordnung kleiner. Die Vermutung liegt nahe, dass die Richtung und Größenordnung auftretender Hystereseeffekte instrumentenspezifisch sind und zumindest die Größenordnung mit der Transportart korreliert (Schmeer 2006). Da eine Verlängerung der Aufstellzeit zur Erfassung der Hystereseeffekte in der Regel zu einer Verringerung der Anzahl der durchgeführten Verbindungsmessungen führt, scheint es empfehlenswert, den Messablauf für jedes Instrument

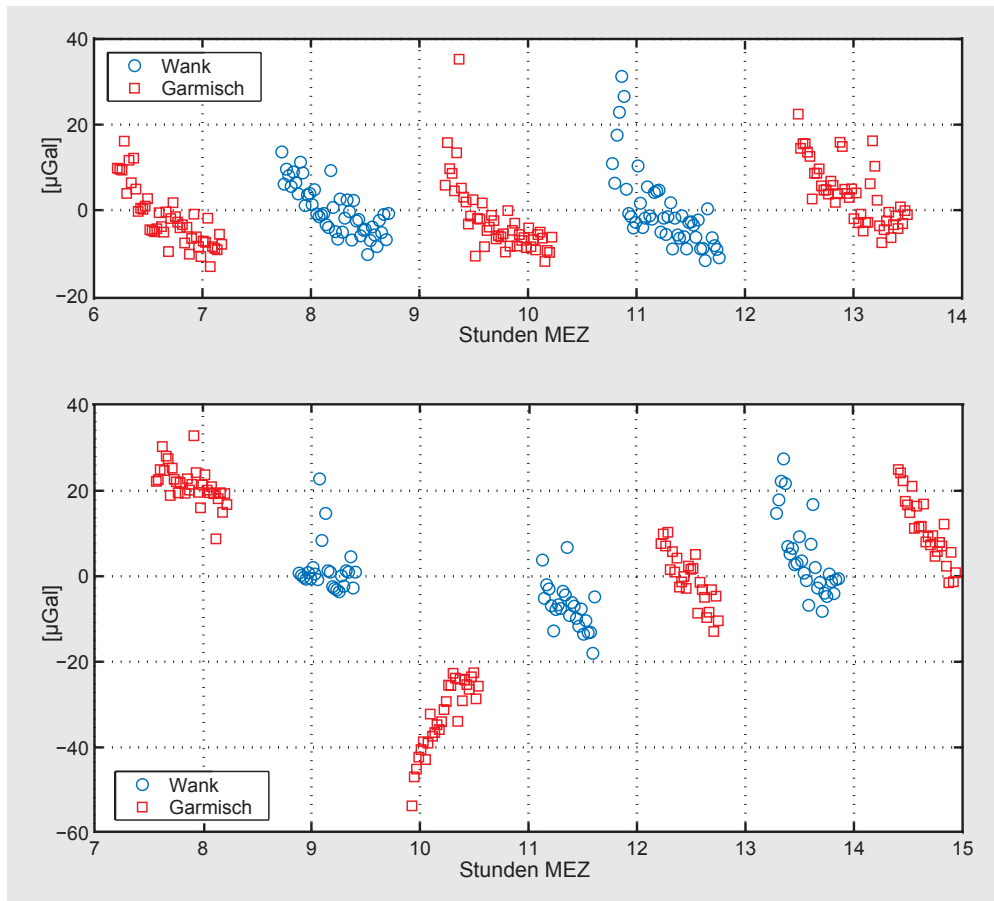


Abb. 4: Hysterese von CG3-310218 nach Transport an zwei unterschiedlichen Messtagen. Jede Signatur steht für eine 60 Sekunden Messung unter Abzug der jeweiligen Schwereunterschiede zwischen beiden Messpunkten und einer Instrumentendrift. Die Messdauer beträgt zwischen 30 und 60 Minuten. Oben: starke, jedoch homogene Hysterese. Unten: inhomogene Hysterese.

unter bestmöglicher Kenntnis seines Hystereseverhaltens anzupassen.

Temperatur

Die Thermostatisierung hält die Temperatur innerhalb des Sensors mit einer Genauigkeit von 10^{-3} K. Dazu werden residuale Schwankungen mit einer Genauigkeit von 10^{-5} K registriert und bereits im Instrument an den Ausgabewerten mit einem Korrekturkoeffizienten angebracht. Diese Korrekturen haben signifikante Auswirkungen auf das Messergebnis. Insbesondere bei Messungen zum und vom Gipfel der Zugspitze können relativ starke residuale Schwankungen der Sensortemperatur festgestellt werden. Eine Korrelation zwischen der Sensortemperatur und den Ablesewerten der Gravimeter wurde bisher jedoch nicht gefunden.

Luftdruck

Gravimeter vom Typ Scintrex sind gegenüber Schwankungen des Umgebungsdrucks nicht restlos unempfindlich. Große Unterschiede im Luftdruck, wie sie im System Garmisch-Zugspitze im Bereich von bis zu 240 hPa auftreten, könnten nach Hugill (1988) Fehler in der Größenordnung von 5–10 μ Gal ausmachen, was zu einem zusätzlichen relativen Fehler von $1-2 \cdot 10^{-5}$ führt.

Elektronik

Präzisionsgravimetrische Anwendungen im Bereich von 10^{-5} setzen eine Stabilität der Instrumentenelektronik in

ähnlicher Größenordnung voraus. Allerdings ist beispielsweise der Analog-Digital-Wandler des elektrostatischen Messensors nicht für diese Werte spezifiziert. Ein möglicher Einfluss auf die Messgenauigkeit sollte untersucht werden.

4.4 Praktische Durchführung präzisionsgravimetrischer Messungen

Um die größtmögliche Genauigkeit einer Kalibriermessung für ein Scintrex-Gravimeter zu erreichen, ist es erforderlich, bestimmte Vorgehensweisen anzuwenden. Nach unseren Erfahrungen hat sich folgender Messablauf als vorteilhaft herausgestellt:

- Messung wird im Dauermessmodus *cycling mode* (cycling time: 76 Sekunden; reading time: 60 Sekunden) mindestens 30 Minuten lang durchgeführt.
- Um unnötige Erschütterungen durch anwesende Personen zu vermeiden, empfiehlt es sich, den Messort/-raum während einer Messung zu verlassen, sich aber in näherer Umgebung aufzuhalten.
- Zwei Messpunkte im Kalibriersystem werden an einem Tag in abwechselnder Reihenfolge drei- bis fünfmal wiederbesetzt. Dies geschieht aus Gründen der Bestimmung einer Instrumentendrift sowie zur Verringerung der Wirkung zufälliger aufstellungsabhängiger Fehler.
- Eine Umhüllung des Instruments beispielsweise mit Schaumstoff kann v.a. bei Messungen in den Win-

termonaten die Temperaturstabilität des Gravimetergehäuses verbessern. Vermutungen, die eine Korrelation zwischen dem Nachlaufen des Schweresensors und Variationen der Umgebungstemperatur nahelegen, konnten jedoch noch nicht belegt werden.

- Besondere Achtsamkeit erfordert der Transport des zu kalibrierenden Gravimeters. Während einer Autofahrt ist das Gerät am besten in der vom Hersteller mitgelieferten Transportkiste zu befördern, waagrecht stehend und ausgekleidet mit einer zusätzlichen Lage Schaumstoff. Auf defensive Fahrweise ist zu achten.
- Der Transport während, von und zu den Seilbahnfahrten sollte ausschließlich in der Instrumententasche erfolgen. Dabei sollte vermieden werden, das Instrument direkt, ohne ausreichend dämpfenden Schaumstoff, auf den Boden der Seilbahnkabine zu stellen.

5 Schlussfolgerungen

Im neu eingerichteten Gravimeterkalibriersystem Zugspitze liegen genau bestimmte Absolutschwerewerte in sechs Kalibrierpunkten vor. Durch die großen Schwereunterschiede von bis zu 528 mGal und durch die sehr kurzen Transportzeiten eignen sich die Kalibrierpunkte sehr gut zur genauen Bestimmung von linearen Kalibrierfaktoren für Relativgravimeter vom Typ Scintrex.

Im Zuge der Einrichtung und mehrjährigen Nutzung des Kalibriersystems sind eine Reihe von Erfahrungen gewonnen worden. Wiederholte Absolutgravimetermessungen zusammen mit einer fast zweijährigen Zeitreihe von Kalibriermessungen mit Relativgravimetern ergaben eine gute Kenntnis der zeitlichen Schwereänderungen in den Kalibrierpunkten sowie des Verhaltens der eingesetzten Gravimeter. Es wurde festgestellt, dass die Schwerewerte in den Kalibrierpunkten in den Monaten Juli bis Dezember nur geringe Änderungen aufweisen. Dieser Zeitraum ist daher für eine genaue Kalibrierung sehr gut geeignet. Für Verbindungsmessungen mit Scintrex-Relativgravimetern zwischen den Kalibrierpunkten wurden Messgenauigkeiten von unter 15 µGal erreicht. Wiederholte Kalibriermessungen mit drei Scintrex-Gravimeter ergaben lineare Kalibrierfaktoren im Genauigkeitsbereich von $1\text{--}2 \cdot 10^{-5}$. Für eintägige Messungen mit weiteren Geräten kann mit einer immer noch sehr guten Kalibriergenauigkeit von $4 \cdot 10^{-5}$ gerechnet werden. Im Zeitraum Januar bis Juni traten deutliche Schwereänderungen am Zugspitzgipfel auf, die mit dem Jahresgang der Anziehung der Schneemassen korreliert sind. Dieser Zeitraum sollte für Kalibriermessungen gemieden werden, wenn keine zeitgleichen Absolutmessungen durchgeführt werden.

Die Autoren möchten eine weitergehende Nutzung des Kalibriersystems anregen und würden sich freuen, wenn es dort zu weiteren Messungen kommt. Entsprechende Empfehlungen und Hinweise sollen als Hilfestellung dienen. Zu den bisherigen Nutzern gehören das BKG und

das Geodätische Institut der Universität Stuttgart. Ansprechpartner für Interessenten ist Christian Ackermann am IAPG der TU München.

Abschließend sei noch auf eine langfristige Perspektive hingewiesen. Eine Wiederholung der absoluten Schweremessungen gemeinsam mit Beobachtungen der geometrischen Höhen zu einem späteren Zeitpunkt könnte Hinweise auf die Auswirkungen der Alpenhebung in diesem Bereich geben.

Dank

Die Autoren danken dem IFE, Hannover, (Dr. Timmen) und dem BKG, Frankfurt, (Dr. Falk, Dr. Wilmes) für die Begleitung und Umsetzung der Messkampagnen. Große Unterstützung wurde auch von der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus geleistet. Die Kommission für Glaziologie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften in München stellte die Daten des GLOWA-Danube-Modells zur Verfügung. Wir danken auch zwei Reviewern für die Beiträge zur Verbesserung des Manuskripts.

Literatur

- Budetta G., Carbone D.: Potential application of the Scintrex CG3M gravimeter for monitoring volcanic activity: results of field trials on Mt. Etna, Sicily. *Journ. Volcanology and Geotherm. Research* 76, S. 199–214, 1997.
- Flury J.: Schwerefeldfunktionale im Gebirge: Modellierungsgenauigkeit, Messpunktdichte und Darstellungsfehler am Beispiel des Testnetzes Estergebirge. Dissertation, DGK C 557, 2002.
- Flury J., Peters T., Schmeer M., Timmen L., Wilmes H., Falk R.: Precision Gravimetry in the New Zugspitze Gravity Meter Calibration System. In: *Proceed. IAG Symposium of the Int. Gravity Field Service in Istanbul*, Harita Dergisi (special issue 18), S. 401–406, 2007.
- Flury J., Rummel R.: On the geoid-quasigeoid separation in mountain areas. *Journ. Geodesy*, DOI: 10.1007/s00190-009-0302-9, published online, 2009.
- Hackl S.: Geometrischer Höhenanschluß von Erdschweremessungen in Garmisch und der Zugspitze. Diplomarbeit TU München und FH München, 2005.
- Hackney R.: A gravity-based study of the Pilbara-Yilgarn Proterozoic Continental Collision Zone and the South-Eastern Hamersley Province, Western Australia. PhD Thesis, Curtin Univ. Perth, 2001.
- Hugill AL: The new Scintrex CG-3 Autograv gravity meter: description and test results. ASEG/SEG Conference, Adelaide, Australia, 1988.
- Kanngieser E., Kummer K., Torge W., Wenzel HG: Das Gravimeter Eichsystem Hannover. *Wiss. Arb. der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover*, Nr. 120, 1983.
- Kistler E., Attwenger M., Dorsch J.: Grenzüberschreitendes Laser-scanning-Projekt der Länder Tirol und Bayern. *Mitt. DVW Bayern* 1/2009, S. 55–68.
- Marzahn K.: Das Deutsche Schweregrundnetz. DGK B 23 Teil VI, 1958.
- Mausser W., Ludwig R.: GLOWA-DANUBE: A research concept to develop integrative techniques, scenarios and strategies regarding global changes of the water cycle. In: M Beniston (ed), *Climatic Change: Implications for the Hydrological Cycle and for Water Management*, *Advances in Global Change Research*, 10, S. 171–188, Kluwer, 2002.
- Morelli C.: Taratura di due gravimetri Worden e collegamenti europei. *Annali di Geofisica* IV(4), 1951. Zitiert nach: W Grossmann (ed), *Ergebnisse einiger Schweremessungen in Westeuropa*. DGK B 11, 1953.

- Neumeyer J., Hagedoorn J., Leitloff J., Schmidt T.: Gravity reduction with three-dimensional atmospheric pressure data for precise ground gravity measurements. *Journ. Geodynamics*, 38, S. 437–450, 2004.
- Peters T.: Modellierung zeitlicher Schwerevariationen und ihre Erfassung mit Methoden der Satellitengravimetrie. Dissertation, DGK C 606, 2007.
- Schmeer M.: Zeitliche Stabilität und zeitliche Veränderungen im Gravimetereichsystem Garmisch-Zugspitze. Diplomarbeit TU München, 2006.
- Timmen L., Gitlein O.: The capacity of the Scintrex Autograv CG3M no. 4492 gravimeter for absolute scale surveys. *Revista Brasileira de Cartografia* 56/02, S. 89–95, 2004.
- Timmen L., Flury J., Peters T., Gitlein O.: A new absolute gravity base in the German Alps. In: M Hvoždara, I Kohúh (eds.): *Contributions to Geophysics & Geodesy* 36 (special issue), *Proceed. 2nd Workshop on Int. Gravity Field Research*. Geophys. Inst. Slovak Academy of Sciences, S. 7–20, 2006.
- Weiken K.: *Ergebnisse der Pendelmessungen der Jahre 1934 bis 1943*. Publ. Nr. 3, Geodätisches Institut Potsdam, 1950.

Autoren

Dr.-Ing. Thomas Peters
Landesamt für Vermessung und Geoinformation
Alexandrastraße 4, 80538 München

Dipl.-Ing. Martin Schmeer
GeoForschungsZentrum Potsdam, c/o DLR Oberpfaffenhofen
Münchner Straße 20, 82234 Weßling

Prof. Dr.-Ing. Jakob Flury
Institut für Erdmessung, Leibniz Universität Hannover
Schneiderberg 50, 30167 Hannover

Dipl.-Ing. (FH) Christian Ackermann
Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie
Technische Universität München
80290 München
ackermann@bv.tum.de