

Mikroschweremessungen zur Aufdeckung lokaler Schwereänderungen am Absolutschwere-Messpunkt des Black Forest Observatory in Schiltach

*Malte Westerhaus, Walter Zürn, Klaus Lindner,
Peter Duffner, Thomas Forbriger und Rudolf Widmer-Schmidrig*

1 Motivation

Das Geowissenschaftliche Gemeinschaftsobservatorium des Karlsruher Instituts für Technologie und der Universität Stuttgart, auch als Black Forest Observatory (BFO) bezeichnet, ist in der Grube Anton, einem ehemaligen Silber- und Kobaltbergwerk bei Schiltach im Schwarzwald, untergebracht. Eine der Hauptaufgaben des Observatoriums ist die systematische Beobachtung des Erdschwerefeldes. Neben der kontinuierlichen Erfassung zeitlicher Schwerevariationen durch dauerhaft installierte Relativgravimeter gehört dazu eine wiederholte Messung der absoluten Schwerebeschleunigung an einem festgelegten Ort im Stollensystem. Ergänzt werden die Schweremessungen durch eine permanente GNSS-Station, die zu einer Trennung zwischen Höhenänderungen und Massenbewegungen beitragen soll.

Die Messung der absoluten Schwere wird seit März 2001 durch verschiedene externe Organisationen mit Freifall-Gravimetern des Typs FG5 durchgeführt. Bis zum heutigen Zeitpunkt haben acht Messungen stattgefunden, an denen das Observatoire Gravimétrique de l'Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre in Strasbourg (EOST), die Außenstelle Leipzig des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie (BKG), das Institut für Erdmessung der Universität Hannover (IfE) sowie das Observatoire Royal de Belgique in Brüssel (ORB) beteiligt waren.

Die Genauigkeit der FG5-Gravimeter für eine einzelne Messkampagne an einer einzelnen Station ist besser als $\pm 3 \mu\text{Gal}$ [Francis, 2005]. Die Variationsbreite der Messungen am BFO liegt mit einer Ausnahme innerhalb dieses Wertes. An den beiden aufeinanderfolgenden Messungen von EOST am 15.03.2001 und 26.11.2003 wurde allerdings ein scheinbarer Schwereunterschied von $10.3 \mu\text{Gal}$ beobachtet. Legt man den lokalen Schweregradienten von $225.7 \mu\text{Gal/m}$ zu Grunde, entspräche dies einer Höhenänderungen von ca. 4.5 cm, was aus tektonischer Sicht sehr unwahrscheinlich ist. Als alternative Ursachen kommen in Betracht:

- technische Probleme: der Schwereunterschied könnte durch eine später festgestellte Dejustierung des Lasers hervorgerufen worden sein (Hinderer, pers. Mittlg. 2005);
- hydrologische Schweresignale durch verstärkten Grundwassereintrag im Frühjahr;
- lokale Massenverlagerungen in der Umgebung des Messpunktes.

Auch wenn technische Probleme des Gravimeters als wahrscheinlichste Ursache für die scheinbare Schwereänderung angesehen werden, hat doch die Diskussion über diesen Effekt dazu geführt, die Lage des Absolutschwere-Messpunktes im Stollen zu überdenken. Die Messungen werden auf einem soliden Fundament mit Kontakt zum anstehenden Granit im Bereich der sog. „Heinrich-Kluft“ (Abb. 1-1) durchgeführt, d. h. in einer der beiden ehemaligen Hauptabbauzonen der Grube Anton. In diesen Zonen wurde der Raum beträchtlich erweitert, und es gibt zusätzliche Stollen ober- und unterhalb der derzeitigen Nutzungsebene. Alle tiefer gelegenen Hohlräume sind

heutzutage geflutet, die Verbindungsschächte zwischen den Stollenebenen durch Gesteinsmaterial verfüllt. Dieses Material ist allerdings nicht verfestigt, und Massenänderungen durch Kompaktion, Rutschungen und Seitwärtsbewegungen des Füllmaterials in den unteren Gängen können nicht ausgeschlossen werden. Aus diesem Grunde wurde beschlossen, ein Mikroschwerenetz im Stollen einzurichten und die zeitliche Stabilität des Absolutschwere-Messpunktes relativ zu anderen fest vermarkten Punkten durch wiederholte Verbindungsmessungen mit Relativgravimetern zu überprüfen.

Die Ergebnisse dieses Experimentes werden im Folgenden vorgestellt und diskutiert. Die unter höchsten Genauigkeitsanforderungen durchgeführten Messungen dokumentieren die derzeitige Qualität der beiden LaCoste-Romberg Gravimeter des Geodätischen Instituts (GIK) des Karlsruher Instituts für Technologie, die Frage nach der zeitlichen Stabilität des Absolutmesspunktes am BFO kann allerdings auf Basis des vorhandenen Datenmaterials nicht eindeutig beantwortet werden.

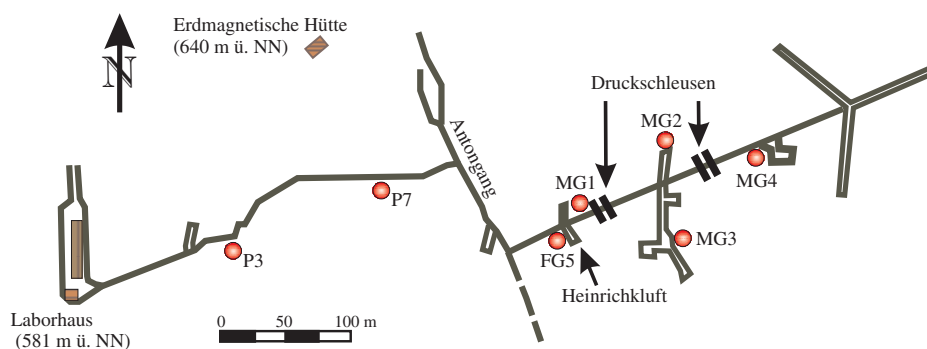


Abb. 1-1: Stollenplan des BFO mit den Messpunkten des Mikroschwerenetzes

2 Ein neues Verfahren zur Bestimmung und Darstellung der Gravimeterdrift

Eine der limitierenden Größen für die Genauigkeit von Schweremessungen mit Federgravimetern ist die sogenannte Drift, die durch zeitliche Änderungen der Federkonstanten und der Geometrie des Sensorsystems sowie durch die Wirkung äußerer Kräfte auf die Gravimetermasse hervorgerufen wird. Zur Erfassung der Drift werden auf einem oder mehreren Punkten Wiederholungsmessungen durchgeführt. Unter der Annahme, dass die wahre Schwere auf einem Punkt zeitlich stabil ist, können zeitliche Änderungen der Messwerte auf die Gravimeterdrift zurückgeführt werden. Innerhalb einer Gruppe von Messungen auf ein und demselben Punkt besteht dabei ein eindeutiger Zusammenhang; Verbindungsmessungen zwischen zwei Punkten, deren Schwereunterschied unbekannt ist, können für die Driftbestimmung jedoch nicht verwendet werden. Bei Verwendung von Wiederholungsmessungen auf mehreren Punkten ergibt sich damit ein unterbestimmtes Problem. Watermann [1957] schlägt eine graphische Lösung für diesen Fall vor. Danach werden die zusammengehörigen Messungen auf einem Punkt als Funktion der Zeit dargestellt. Anschließend werden die Punktgruppen per Hand parallel verschoben, bis sich eine Kurve mit möglichst niedriger Ordnung ergibt, aus der die Drift abgegriffen werden kann. Dabei muss das Auge zwischen den unvermeidlichen Streuungen durch Messfehler vermitteln. Das Verfahren liefert im Allgemeinen befriedigende Resultate, bleibt aber bis zu einem gewissen Grade subjektiv [Torge, 1989].

Im folgenden wird eine Methode vorgestellt, nach der diese Verschiebungsprozedur analog zu einem in der SAR-Interferometrie bekannten Ausgleichungsansatz nach einem objektiven Kriterium durchgeführt werden kann. Die Herleitung folgt weitgehend der Argumentation von Berardino et al. [2002], die auf das vorliegende Problem übertragen werden kann. Ausgangspunkt ist die oben genannte Forderung, dass die zeitlichen Änderungen der Schwere eine Kurve möglichst geringer Ordnung ergeben sollen. Die Drift, d.h. die Ableitung der Schwerekurve nach der Zeit, muss demnach möglichst kleine Werte annehmen. Gesucht wird also ein Lösungsvektor für die Drift mit minimaler Norm.

Betrachtet man zunächst den Sonderfall, dass nur Messungen auf einem einzigen Punkt durchgeführt werden, so ergeben sich $N + 1$ Messungen zu Zeitpunkten $t_i, i = 0 \dots N$. Relativgravimeter sind zur Beobachtung von Schweredifferenzen vorgesehen; man kann daher als Beobachtungsvektor $\underline{\Delta g}^T = [\Delta g_1 \dots \Delta g_M]$ einen Vektor ansetzen mit den gemessenen Schweredifferenzen $\Delta g_j = g(t_{i_E}) - g(t_{i_S}), i_E > i_S$ und $M \geq N$. $\underline{\Delta g}$ kann beliebige Differenzen enthalten, zum Beispiel: $\Delta g_2 = g(t_6) - g(t_3)$. Gesucht werden die N Schwerewerte $\underline{g}^T = [g(t_1) \dots g(t_N)]$, dabei wird $t_0 = 0$ und $g_0 = g(t_0) = 0$ vorausgesetzt. Es ergibt sich ein System mit M Gleichungen und N Unbekannten, das sich formal schreiben lässt als:

$$\underline{\Delta g} = \underline{A} \cdot \underline{g} \quad (2-1)$$

\underline{A} ist eine $M \times N$ Matrix mit Rang N , die die Differenzbildung regelt; nach Beispiel oben:

$$\begin{bmatrix} \dots \\ \Delta g_2 \\ \dots \\ \dots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & +1 & 0 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dots \\ g_3 \\ \dots \\ \dots \\ g_6 \\ \dots \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

Eine Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen führt auf eine eindeutige Lösung für dieses Problem. Wenn man für t_{i_S} generell t_0 einsetzt (d.h. alles auf den ersten Wert bezieht), hat die Indexmatrix \underline{A} die Form $N \times N$, und es ergibt sich ein einfach nachvollziehbares Gleichungssystem.

Bei Messkampagnen mit Federgravimetern liegen im Allgemeinen jedoch jeweils mehrere Messungen auf verschiedenen Punkten vor. Sofern deren Schwereunterschiede nicht bekannt sind, können Verbindungsmessungen zwischen den Punkten nicht für eine Driftbestimmung verwendet werden.. Das System ist dann unterbestimmt; bei $N + 1$ Messungen auf L verschiedenen Punkten hat die Matrix \underline{A} den Rang $R = N - L + 1$. In diesem Fall lässt sich eine Lösung der Matrixgleichung über Singulärwertzerlegung finden. Da der Lösungsvektor von minimaler Norm sein wird, empfiehlt es sich nach den Eingangsüberlegungen an dieser Stelle auf die zeitliche Ableitung der Schwere, also die Drift als Unbekannte überzugehen. Damit folgt:

Vektor der Unbekannten:

$$\underline{\dot{g}}^T = \left[\frac{g_1 - g_0}{t_1 - t_0}, \frac{g_2 - g_1}{t_2 - t_1}, \dots, \frac{g_N - g_{N-1}}{t_N - t_{N-1}} \right] \quad (2-3)$$

Vektor der Beobachtungen:

$$\underline{\Delta g}^T = [\Delta g_1, \Delta g_2, \dots, \Delta g_M]; \quad M \geq N - L + 1; \quad L = \text{Anzahl Punktgruppen} \quad (2-4)$$

Das funktionale Modell lautet:

$$\Delta g_j = \sum_{k=IS_j+1}^{IE_j} (t_k - t_{k-1}) \dot{g}_k \quad \forall j = 1, \dots, M \quad (2-5)$$

mit der Matrizenformulierung:

$$\underline{\Delta g} = \underline{B} \cdot \underline{\dot{g}} \quad (2-6)$$

In der Matrix \underline{B} stehen jetzt die Zeitdifferenzen zwischen zwei miteinander verknüpften Messungen innerhalb einer Gruppe. Wird zum Beispiel in der folgenden Reihenfolge auf den Punkten A bis E gemessen: A(t_0), B(t_1), C(t_2), D(t_3), E(t_4), D(t_5), C(t_6), B(t_7), A(t_8), so gehören $g_6 = g(t_6)$ und $g_2 = g(t_2)$ zu einer Gruppe (zwei aufeinander folgende Messungen am Punkt C). Es sei:

$$\begin{aligned} \dot{g}_1 &= \frac{g_1 - g_0}{t_1 - t_0}; & \dot{g}_2 &= \frac{g_2 - g_1}{t_2 - t_1}; & \dot{g}_3 &= \frac{g_3 - g_2}{t_3 - t_2}; \\ \dot{g}_4 &= \frac{g_4 - g_3}{t_4 - t_3}; & \dot{g}_5 &= \frac{g_5 - g_4}{t_5 - t_4}; & \dot{g}_6 &= \frac{g_6 - g_5}{t_6 - t_5} \end{aligned} \quad (2-7)$$

Mit $i_S = 2$ und $i_E = 6$ ergibt sich für diesen Fall:

$$\begin{bmatrix} \dots \\ \Delta g_2 \\ \dots \\ \dots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & t_3 - t_2 & t_4 - t_3 & t_5 - t_4 & t_6 - t_5 & 0 & 0 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dots \\ \dot{g}_3 \\ \dot{g}_4 \\ \dot{g}_5 \\ \dot{g}_6 \\ \dots \end{bmatrix} \quad (2-8)$$

Die Lösung von Gl. 2-6 wird über Singulärwertzerlegung gefunden. Nach der Bestimmung der Unbekannten folgt ein Integrationsschritt, um die Kurve der zeitlichen Schwereänderungen zu erhalten.

Auf der Basis dieses Ansatzes wurde das MATLAB-Programm SVDDDRIFT entwickelt, das auf die Rohablesungen der Gravimeter zugreift und die zu den mehrfach gemessenen Punkten gehörigen Gruppen zu einer durchgehenden Kurve arrangiert, aus der die Drift abgelesen werden kann. Da neben der Drift noch verschiedene zufällige und systematische Fehler in den Daten stecken, ist die resultierende Kurve allerdings in vielen Fällen unruhig. Zur Glättung kann optional ein Polynom niedrigen Grades durch die Kurve gelegt werden, von dem die Driftwerte abgegriffen werden. Das Programm stellt driftkorrigierte Messwerte im Eingangsformat des Auswerteprogramms GRAV (siehe Kap. 4) bereit. Um die Stimmigkeit der Driftkurven zu überprüfen, wurde für einige Beispieldatensätze die Drift per Hand „nach allen Regeln der Kunst“ bestimmt und mit dem berechneten Ergebnis verglichen. Es ergibt sich im Allgemeinen eine gute Übereinstimmung (Abb. 2-1A). In den ausgeglichenen Driftkurven lassen sich auch Diskontinuitäten durch plötzliche Längenänderungen der Feder gut erkennen und bestimmen (Abb. 2-1B).

Das hier vorgestellte Verfahren gibt einen schnellen Eindruck der Qualität einer Messkampagne und ermöglicht es, nicht-lineare Gravimeterdriften effizient zu bestimmen und aus den Messdaten zu entfernen. Dieser Weg wurde im Folgenden generell besprochen. Da allerdings im Zuge der Ausgleichung von Schwerenetzen ebenfalls Driftterme geschätzt werden können, ist eine Entfernung der Drift vor der Auswertung nicht zwingend erforderlich. Das im Rahmen dieser Studie verwendete Programmpaket GRAV erlaubt die optionale Bestimmung eines linearen Driftterms. Ein Vergleich für 20 Messkampagnen zeigt, dass die a-priori Entfernung der Drift in 65% der Fälle zu einer leichten Verbesserung der mittleren Standardabweichung der ausgeglichenen Schwerewerte führt; in 20% der Fällen ändert sich nichts, während sich für 15% der Kampagnen eine Verschlechterung ergibt. Die Veränderungen sind jedoch $< 1 \mu\text{Gal}$ und damit nicht relevant für die in Kap. 4 vorgestellten Endergebnisse.

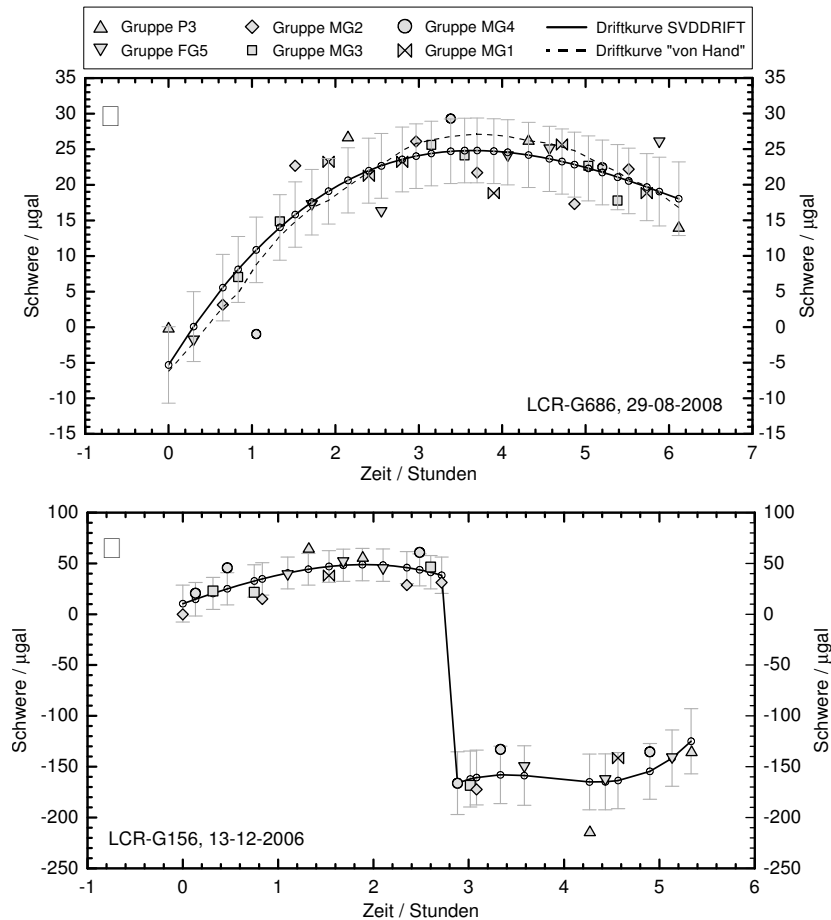


Abb. 2-1: Beispiele für die zeitlichen Veränderungen der Schwerewerte auf Grund der Gravimeterdrift, berechnet mit dem MATLAB-Programm SVDDRIFT. Symbole kennzeichnen die zu einem Messpunkt gehörigen Messwerte (Gruppen). Die Gruppen wurden so gegeneinander verschoben, dass die Ableitung der resultierenden Kurve minimale Norm aufweist. Die durchgezogene Kurve zeigt ein an die rechnerische Lösung gefittetes Polynom 3. Grades, die gestrichelte Kurve die graphische Lösung eines erfahrenen Beobachters. Auch Diskontinuitäten lassen sich in der Driftkurve gut erkennen (B).

3 Messungen

3.1 Verwendete Geräte

Feldgravimeter des Typs LaCoste-Romberg (LCR) erreichen eine den FG5 Gravimetern vergleichbare Genauigkeit und sind damit für die Aufgabenstellung prinzipiell geeignet. Die Genauigkeit einer einzelnen Messung mit einem gut funktionierenden LCR-Gravimeter liegt bei unter $10 \mu\text{Gal}$; durch Mehrfachbesetzung der Messpunkte können Genauigkeiten $< 1 \mu\text{Gal}$ erreicht werden [Naujoks et al., 2008]. Für die Vermessung des Mikroschwerenetzes wurden vorrangig die LaCoste-Romberg G-Gravimeter des GIK mit den Nummern 156 und 686 verwendet (im Folgenden als LCR-G156 und LCR-G686 bezeichnet). Sie standen während der gesamten Zeit zur Verfügung und können somit für eine Untersuchung zeitlicher Schwerevariationen verwendet werden. Es war vorgesehen, auch das Gravimeter LCR-G249 des GIK für diesen Zweck einzusetzen. Allerdings traten bei seinem Einsatz erhebliche Probleme auf, sodass das Gravimeter zur technischen Überholung eingeschickt werden musste.

Drei weitere Gravimeter wurden jeweils für einen beschränkten Zeitraum von einigen Wochen ausgeliehen (Tab. 3-1). Es handelt sich dabei um die mit elektrostatischem Feedback ausgerüsteten LCR-Gravimeter G085 des Instituts für Geodäsie und Geoinformationstechnik an der Technischen Universität Berlin und D187 vom Institut für Geowissenschaften der Universität Jena, sowie um ein Scintrex-CG3 Gravimeter des Landesamtes für Kataster-, Vermessungs- und Kartenwesen (LKVK) des Saarlandes [Wöllner, 2007]. Die mit diesen Gravimetern erhobenen Messwerte wurden für die Stabilisierung des Referenznetzwerkes verwendet, auf Grund ihrer kurzen Einsatzzeit jedoch nicht für die Untersuchung zeitlicher Schwerevariationen. Leider traten auch beim Einsatz des LCR-D187 unerwartete Probleme auf, sodass diese Werte ebenso wie die von G249 erhobenen Messdaten nicht in die Auswertung eingehen.

Tab. 3-1: Messkampagnen und Auswertergebnisse für die vier eingesetzten Relativgravimeter.

	LCR-G686			LCR-G156			Scintrex-CG3		LCR-G085	
	N	m_0 μGal	σ_{FG5} μGal	N	m_0 μGal	σ_{FG5} μGal	N	m_0 μGal	N	m_0 μGal
30.11.2005	17	3.0	4.2	14	2.5	5.1				
18.01.2006				17	3.8	7.1				
24.03.2006	13	5.7	4.2	12	7.4	7.4				
09.05.2006	10	3.4	5.4							
30.05.2006	10	1.6	2.3				12	3.1		
31.05.2006							20	9.0		
12.06.2006							12	3.7		
13.06.2006							32	3.6		
19.06.2006							24	5.9		
20.06.2006							25	5.5		
13.12.2006	22	2.7	2.6	19	3.5	3.9				
04.04.2007	21	2.9	2.4	17	2.3	5.5			23	1.8
12.04.2007									18	2.3
13.04.2007									19	2.3
20.07.2007	18	2.7	2.5	20	1.8	4.7				
23.04.2008	30	2.1	2.0	17	2.5	5.2				
29.08.2008	28	2.3	1.9							

N = Anzahl der in die Ausgleichung eingehenden Schweredifferenzen; m_0 = mittlere Standardabweichung der Punktschwerewerte bei freier Netzausgleichung (Kap. 4.2);
 σ_{FG5} = Standardabweichung für Punkt FG5 bei dynamischer Ausgleichung (Kap. 4.4)

Die eingesetzten Gravimeter unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Bauformen und Eigenschaften. Das wesentliche Konstruktionsmerkmal der LaCoste-Romberg Gravimeter ist eine astasierte Metallfeder, die eine sehr hohe Genauigkeit und Stabilität der Ablesungen ermöglicht. Die Gravimeter des GIK werden ohne Feedback nach der Nullmethode betrieben, d.h. zur Ablesung wird die Ausgangsposition manuell durch Verstellen des Gravimeterarms über eine Spindel wieder hergestellt. Bei dieser Technik hängt die Qualität der Messung stark vom Beobachter ab, außerdem wird der Messwert unter anderem potentiell von periodischen Eichfehlern, sog. „Spindelfehlern“, beeinflusst. Bei den mit Feedback ausgerüsteten LCR-Gravimeter halten elektrostatische Kräfte den Gravimeterarm stets in der Nulllage. Schwereunterschiede führen zu variablen „Halte“spannungen, die auf einem Digitalvoltmeter angezeigt werden. Ein manuelles Eingreifen des Beobachters ist nur noch in wenigen Situationen notwendig. Innerhalb des zulässigen Spannungsbereiches des Feedbacksystems wirken sich Spindelfehler nicht aus, allerdings ist

der Gesamtschwereunterschied am BFO mit ca. $7900 \mu\text{Gal}$ so groß, das auch mit LCR-G085 an zwei verschiedenen Spindelpositionen gemessen werden musste.

Das Scintrex CG3 Gravimeter hat dagegen ein vollständig anderes Messprinzip. Es handelt sich um eine vertikal aufgehängte Quarzfeder, deren Längenänderungen über einen kapazitiven Wegaufnehmer erfasst und im internen Datenspeicher abgelegt werden. Eine den LCR-Gravimetern vergleichbare Messgenauigkeit wird über die Registrierung einer hohen Anzahl von Messwerten pro Aufstellung und anschließende Mittelwertbildung erreicht. Das Scintrex CG-3 hat eine höhere Bauform als die LaCoste-Romberg Gravimeter, auch das Abgriffsystem befindet sich höher über dem Bodenpunkt.

Man kann davon ausgehen, dass sich mögliche systematische Fehler durch äußere Einflüsse (elektromagnetische Felder, Temperatur- und Luftdruckvariationen sowie lokale Schweregradienten) bei den verwendeten Gravimetertypen unterschiedlich auswirken, was im Hinblick auf realistische Aussagen zur Genauigkeit des Gesamtergebnisses hilfreich ist.

3.2 Eichfaktoren

Der lineare Eichfunktionsterm der GIK-Gravimeter wird in regelmäßigen Abständen auf der Eichlinie Hornisgrinde überprüft. Im Zeitraum 2003 bis 2010 treten zeitliche Variationen von $\pm 1 \cdot 10^{-4}$ für LCR-G686 und $\pm 2 \cdot 10^{-4}$ für LCR-G156 auf (Abb. 3-1). Langfristige Trends sind nicht erkennbar. Umgerechnet auf den Gesamtschwereunterschied am BFO von 7.88 mGal ergeben sich daraus Schwerevariationen von $\pm 0.8 \mu\text{Gal}$ bzw. $\pm 1.6 \mu\text{Gal}$. Dies ist im Bereich der geforderten Genauigkeit für das BFO-Netz. Die im Vergleich zu den Ergebnissen des LCR-G686 deutlich größeren Fehlerbalken für das LCR-G156 deuten allerdings auf einen starken Einfluss nicht linearer Effekte (die aber nicht durch quadratische oder kubische Eichfunktionsterme erklärt werden können) oder generelle instrumentelle Probleme hin. Diese sind zur Zeit noch nicht abschließend untersucht. Wie weiter unten gezeigt wird, spielen sie vermutlich auch am BFO eine Rolle. Für die Auswertung der BFO-Messungen wurde ein gewichtetes Mittel des linearen Funktionsterms im Zeitraum 2003 bis 2010 verwendet (siehe Tabelle 3-2). Das Scintrex-CG3 wurde am 22. Juni 2006 ebenfalls auf der Eichlinie getestet; die Verbesserung zu dem vom LKVK mitgelieferten linearen Eichfaktor beträgt 0.999924 und wurde in der Auswertung berücksichtigt.

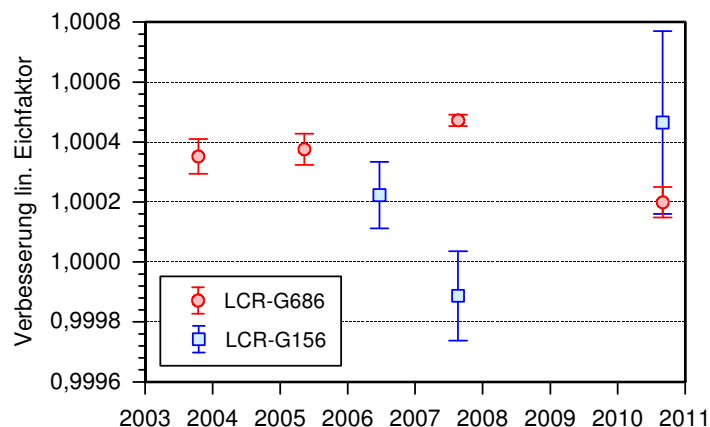


Abb. 3-1: Ergebnisse der Überprüfung der Gravimeter LCR-G686 und G156 auf der Eichlinie Hornisgrinde. Dargestellt sind lineare Eichfunktionsterme als Verbesserung zur Hersteller-Eichtabelle.

Die oben angesprochenen periodischen Eichfehler hängen von den Übersetzungsverhältnissen der Zahnräder im Spindelgetriebe der LCR-Gravimeter ab. Unter Vorgabe der daraus ableitbaren

Perioden können periodische Eichfunktionsterme bestimmt werden. Entsprechende Werte wurden den Arbeiten von Finkbohner [1996] und Naujoks et al. [2008] entnommen. Tab. 3-2 enthält eine Zusammenstellung der verwendeten Eichfunktionsterme.

Tab. 3-2: Für die Auswertung verwendete Eichfunktionsterme. Alle Angaben für LCR-G085 nach [Naujoks et al., 2008]. Periodische Eichfunktionsterme für LCR-G156 und G686 nach [Finkbohner, 1996].

Gravimeter	Funktionsterm	Verbesserung zum Herstellereichfaktor	X	Y
LCR-G085	linear	1.0017		
LCR-G085	Periode 7.89		-65.8	-23.9
LCR-G085	Periode 3.94		-6.5	-11.3
LCR-G085	Periode 1.00		9.5	-15.3
LCR-G156	linear	1.000265		
LCR-G156	Periode 7.89		-7.0	-28.0
LCR-G156	Periode 3.94		17.0	4.0
LCR-G686	linear	1.000311		
LCR-G686	Periode 7.33		-3.0	34.0
LCR-G686	Periode 3.67		-8.0	13.0

3.3 Messablauf

Es wurden sieben Messpunkte angelegt und mit ebenerdigen Bolzen markiert (Abb. 1-1). Das Gravimeter wurde mit der linken hinteren Stellschraube (Heck-Backbord, wenn man den Einzelfuß des Gravimeters als Bug ansieht) in der Bohrung des Bolzens platziert. Auf eine generelle Ausrichtung der Instrumente nach Norden wurde verzichtet, da dies an einigen Punkten auf Grund der Enge des Stollens zu einer ungünstigen Mess- und Ableseposition geführt hätte. Auch ist die Nordrichtung an einigen Punkten nur ungenau bekannt. Nach dem Ergebnis der Zusatzuntersuchungen (Kap. 3.4) wurde als pragmatische Lösung für jeden Punkt eine feste Ausrichtung vereinbart, die eine möglichst angenehme Bedienung der Geräte ermöglicht (Tab. 3-3).

Tab. 3-3: Ausrichtung der Gravimeter während der Messung

Punktbezeichnung	Ausrichtung
P3	parallel zur Stollenwand, Blickrichtung zur Wand
P7	parallel zur Stollenwand, Blickrichtung zur Wand
FG5	parallel zur Sockelkante, Blickrichtung zur Rückwand des Stollens
MG1	parallel zur Tür, Blickrichtung zur Druckschleuse
MG2	parallel zur Sockelkante, Blickrichtung Rückwand des Stollens
MG3	parallel zur Sockelkante, Blickrichtung zur Wand
MG4	parallel zur Sockelkante, Blickrichtung zur Wand

Die Horizontierung des Gravimeters wurde ausschließlich mit den zwei Stellschrauben vorne links und mitte rechts durchgeführt (Heck-Steuerbord, Bug). Diese Vorgehensweise gewährleistet eine gleich bleibende Instrumentenhöhe, daher konnten die relativ zeitraubenden Höhenmessungen an jedem Messpunkt entfallen. Da nur Schwereunterschiede beobachtet werden, hätten unter einfachen Bedingungen auch eventuelle Veränderungen der Stellschrauben durch anderweitige Nutzung der Gravimeter zwischen den BFO-Messkampagnen keinen Einfluss. Daher wurde eine Messung der Instrumentenhöhe zu keinem Zeitpunkt vorgenommen.

Diese Herangehensweise ist allerdings nur dann gerechtfertigt, wenn keine großen lokalen Variationen des vertikalen Schweregradienten auftreten. Am BFO wurde der vertikale Schweregradient bisher nur am Absolutschwere-Messpunkt (Punkt FG5) bestimmt, für die Messpunkte des Mikroschwerenetzes liegen keine Werte vor. Es ist jedoch bekannt, dass der Schweregradient räumlich alles andere als konstant ist. Auf den Stationen der Gravimetereichlinie an der Hornisgrinde variiert der Schweregradient beispielsweise von $-254 \mu\text{Gal}/\text{m}$ bis $-365 \mu\text{Gal}/\text{m}$. Eine Änderung der Instrumentenhöhe um 1 cm würde in diesem Fall eine Veränderung des Schwerunterschiedes von $1.1 \mu\text{Gal}/\text{m}$ zwischen den Stationen bewirken. Sollte daher der Schweregradient am Punkt FG5 deutlich von den Gradienten der übrigen Punkte im Netz abweichen, könnten Veränderungen der Instrumentenhöhe zwischen den Kampagnen scheinbare zeitliche Variationen der Schwere an diesem Punkt hervorrufen. Ebenso könnte die unterschiedliche Bauform der verwendeten Gravimeter zu systematischen, instrumentenabhängigen Unterschieden der ausgeglichenen Schweredifferenzen im Netz führen. Da sich der Punkt FG5 im Unterschied zu allen anderen Netzpunkten in einer ehemaligen Abbauzone mit vergleichsweise großen Hohlräumen im Gebirge ober- und unterhalb des Punktes befindet, kann ein solcher Einfluss nicht gänzlich ausgeschlossen werden. Es ist zu bemerken, dass, solange keine genauen Werte für die lokalen Schweregradienten vorliegen, dieses Problem auch durch Erfassung der Instrumentenhöhe während der Messung oder zumindest vor jeder Kampagne nicht zu beseitigen wäre. Durch den gänzlichen Verzicht auf eine Dokumentation der Instrumentenhöhen entfällt jedoch die Möglichkeit, die Messungen zu einem späteren Zeitpunkt gegebenenfalls zu korrigieren.

Während der ersten Messkampagnen hat sich gezeigt, dass der Punkt P7 ungünstig liegt und eine Ablesung des Gravimeters nur unter erschwerten Bedingungen zulässt. Die Folge war eine vergleichsweise hohe Streuung der Messwerte. Aus diesem Grund wurde der Punkt ab Mitte 2006 nicht mehr besetzt und bei der Auswertung aller Kampagnen nicht berücksichtigt. Abgesehen von den Schwierigkeiten auf P7 war die erreichte Genauigkeit bei Ein-Tages-Kampagnen (Anfahrt, Messung Rückfahrt am gleichen Tag) generell unbefriedigend. Ab 2007 wurde das Beobachtungsschema dahingehend umgestellt, dass die Anfahrt bereits am Vortag stattfand und die Gravimeter zur Akklimatisierung schon über Nacht in den Stollen gebracht wurden. Durch diese Maßnahme konnte die Standardabweichung deutlich reduziert werden (Tab. 3-1, Abb. 5-1).

3.4 Zusatzuntersuchungen

Wegen der unerwartet hohen Streuung der ersten Messkampagnen mit LCR-G686 und LCR-G156 wurden auf dem Absolutschweresockel (Punkt FG5) zwei zusätzliche Experimente durchgeführt mit dem Ziel, den Einfluss von Azimut Effekten und Horizontalgradienten der Schwere abschätzen zu können. Auf Grund der unterschiedlichen Bauform der verwendeten Gravimeter und möglicher Variationen bei der Gravimeteraufstellung können beide Einflussgrößen zu systematischen und zufälligen Fehlern in den Messungen beitragen.

3.4.1 Azimut Effekt

Das Meßsystem der LaCoste-Romberg Gravimeter ist räumlich ausgedehnt, d. h. die Probemasse ist keine Punktmasse. Nun sind in der Heinrichkluft die Felswände erstens sehr nahe am Sockel und zweitens neigt sich die Ostwand der Klufft sehr stark vom Boden der Klufft in Richtung Westen über den Sockel. Wäre die Probemasse punktförmig dürfte eine Drehung der Gravimeter um eine vertikale Achse über dem Bolzen senkrecht zum Sockel nicht zu Messfehlern führen, bei einem ausgedehnten System kann man dies jedoch nicht ausschließen, so dass ein azimutaler Effekt auftreten könnte.

Ein sehr bekannter weiterer azimuthaler Effekt kann entstehen, wenn das Gravimeter eine Magnetfeldempfindlichkeit erworben hat, da das Erdmagnetfeld den Granit im Stollen durchsetzt. Die Metallfedern der LCR-Gravimeter sind aus einer ferromagnetischen Legierung hergestellt, um die Abhängigkeit der Messwerte von der Temperatur einerseits durch Änderungen der Geometrie und andererseits durch Änderungen der elastischen Parameter mit der Temperatur zu minimalisieren [Forbriger, 2007]. Die Herstellerfirma sorgt normalerweise dafür, dass die Feder keine remanente Magnetisierung besitzt, die sonst im äußeren Magnetfeld zu unerwünschten Drehmomenten führt. Die Feder kann aber im Laufe der Lebensdauer durch äußere Einwirkungen eine solche Magnetisierung erwerben. Diese Empfindlichkeit wurde von vielen Gravimetrikern durch Drehung des Gravimeters im Erdmagnetfeld ermittelt; bei positiver Diagnose musste das entsprechende Gerät zurück zum Hersteller.

Aus diesen Gründen wurde am 12. Dezember 2005 mit dem Gravimeter LCR G-156 eine Messreihe erstellt, bei der das Gerät über dem Bolzen zentriert aufgestellt, in Schritten von 45° zweimal um die vertikale Achse durch den Bolzen gedreht und die Schwere gemessen wurde. Die Drehung erfolgte im Gegenuhrzeigersinn. Zwischen den Messungen wurde das Gerät jeweils arretiert. Das Gravimeter war schon 3 Tage zuvor in den Stollen gebracht worden, um ihm Gelegenheit zu geben, sich auf die Stollentemperatur (ca. 10°C) einzustellen. Die Messungen dauerten etwa zwei Stunden. Die Ablesungen des Zählers wurden in Schwerewerte umgerechnet und gezeitkorrigiert. Eine lineare Drift ($+8.0 \mu\text{Gal}/\text{h}$) wurde aus den Messungen ebenfalls entfernt. Abbildung 3-2 zeigt die reduzierten Schwerewerte als Funktion des Drehwinkels, wobei der Winkel jeweils der Ausrichtung der Längsachse des Geräts mit dem Einzelbein entspricht. 0° entspricht der Richtung senkrecht zu der Kante des Sockels, die grob parallel zur W-Wand der Kluft verläuft. Die Abbildung zeigt, dass zusätzlich zur typischen Streuung der Messungen möglicherweise ein kleiner Azimuteffekt existiert, dessen Amplitude aber $10 \mu\text{Gal}$ nicht überschreitet. Es kann mit diesem Versuch nicht unterschieden werden, ob es sich dabei um eine magnetische Empfindlichkeit handelt oder um die Wirkung auf die verteilten Massen des Gravimeters.

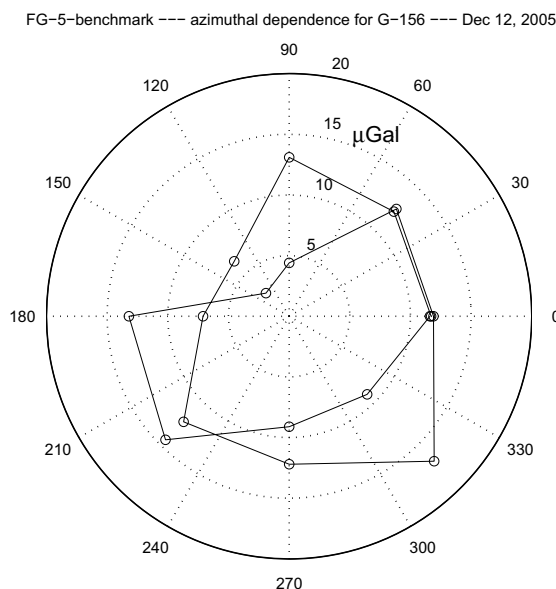


Abb. 3-2: Ergebnis der Untersuchung zum Einfluss des Azimut Effektes. Das Gravimeter wurde nach 0° ausgerichtet und anschließend zweimal um 360° gedreht. Ein Kreis im Abstand des Startwertes vom Mittelpunkt würde bedeuten, dass das Gravimeter keine Azimutabhängigkeit besitzt. Abgesehen von den unvermeidlichen Messfehlern gibt es Anzeichen für einen leichten Azimut Effekt im Sektor zwischen 90° und 180° .

Bei den Vermessungen des Mikroschwerenetzes wurde angestrebt, die Gravimeter azimutal immer gleich auszurichten, so ist die Wirkung der relativ kleinen Azimutabhängigkeit des Gravimeters bei den Messungen auf diesem Sockel sicher vernachlässigbar. In den Schweredifferenzen zwischen den verschiedenen Messpunkten könnten diese Effekte aber durchaus in den Daten vorhanden sein, wären aber zeitlich konstant und würden somit echte Schwereunterschiede vortäuschen, solange alle Messungen mit ein und demselben Gravimeter durchgeführt würden. Allerdings ist zu erwarten, dass zumindest der Magnetfeldeffekt sich von Gravimeter zu Gravimeter unterscheidet, wenn er überhaupt vorhanden ist. So könnte ein Teil der Streuung zwischen den Gravimetern durch diesen Effekt verursacht worden sein. Es ist klar, dass Scintrex-Gravimeter keinen magnetischen Effekt besitzen sollten, da die Tragfeder aus Quarz besteht.

3.4.2 Horizontalgradienten

Wegen der Nähe der Gravimetermesspunkte zu dem Granit der Stollenwände können Horizontalgradienten der Schwere auftreten, die eventuell groß genug sind, um die Messungen zu verfälschen. Um dieses zu untersuchen wurden am 9. Dezember 2005 auf dem Sockel in der Heinrich-Kluft an mehreren Stellen die Schwere gemessen, dabei wurde wieder das LaCoste-Romberg Gravimeter G-156 verwendet. Auf dem Sockel wurden zusätzlich zum zentralen Bolzen, über dem die Mikroschweremessungen gemacht wurden, vier Punkte festgelegt und vorübergehend markiert. Diese werden entsprechend der ungefähren geografischen Lage auf dem Sockel mit NW, SW, SE und NE bezeichnet. In einem kartesischen Koordinatensystem mit Ursprung im zentralen Bolzen mit der x-Achse durch den NW-Punkt haben diese die folgenden Koordinaten (in cm): NW(57, 0); SW(-7.5, 64); SE(-60.5, 0) und NE(7, 66.5). Das Gravimeter wurde jeweils mit dem festgestellten Bein (Heck/Backbord) auf die markierten Punkte gestellt und immer gleich ausgerichtet (0°). Die O-Wand der Kluft verläuft am Boden etwa parallel zu der Verbindungslinie NE-SE. Die Höhenunterschiede zu einem Höhenbolzen sind für NW -9.5 mm, SW -20.5 mm, SE -9.5 mm; NE -10.0 mm und Zentralpunkt -13.5 mm (mit Hilfe einer Wasserwaage ermittelt), die Sockeloberfläche ist also nicht ganz senkrecht zum Schwerevektor. Der vertikale Schweregradient über dem Sockel wurde schon früher zu $-0.2257 \mu\text{Gal}/\text{m}$ ermittelt (K. Lindner, pers. Mittlg. 2001). Damit ergaben sich Höhenkorrekturen relativ zum zentralen Bolzen von: NW -2.2; SW -1.6; SE +0.9 und NE +0.8 μGal . An jedem der 4 dezentralen Punkte wurde dreimal die Schwere gemessen, wobei jedes Mal vorher und nachher der zentrale Punkt aufgesucht wurde. Der zeitliche Verlauf des Versuchs ist aus Abbildung 3-3 ersichtlich. Diese Abbildung zeigt die gemessenen Schwerewerte reduziert für Gezeiten, die Freiluftschwere (s. o.) und eine lineare Drift des Gravimeters von $+12.3 \mu\text{Gal}/\text{h}$. Aus dem Diagramm geht hervor, dass sich die Punkte NW und SW nicht vom Zentralpunkt in der Schwere unterscheiden, dass aber die Punkte in Wandnähe signifikant zum Zentralpunkt verschiedene Schwerewerte aufweisen. Für den Punkt NE beträgt die Differenz etwa -15 bis -20, für den Punkt SE -25 bis -30 μGal . Es ergibt sich klar, dass man sich von den Felswänden fernhalten muss, dass aber in etwa 1 m Abstand die Horizontalgradienten keine signifikanten Abweichungen mehr verursachen.

4 Ergebnis

4.1 Auswertestrategie

Für die Auswertung der Schwerebeobachtungen wurde das von H.-G. Wenzel am Geodätischen Institut Karlsruhe entwickelte Programmpaket GRAV verwendet. GRAV führt die Reduktion von relativen Schweremessungen und die Ausgleichung von Schwerenetzen bzw. den Anschluss von relativen Schweremessungen an übergeordnete Netze durch. Eine kurze Beschreibung der

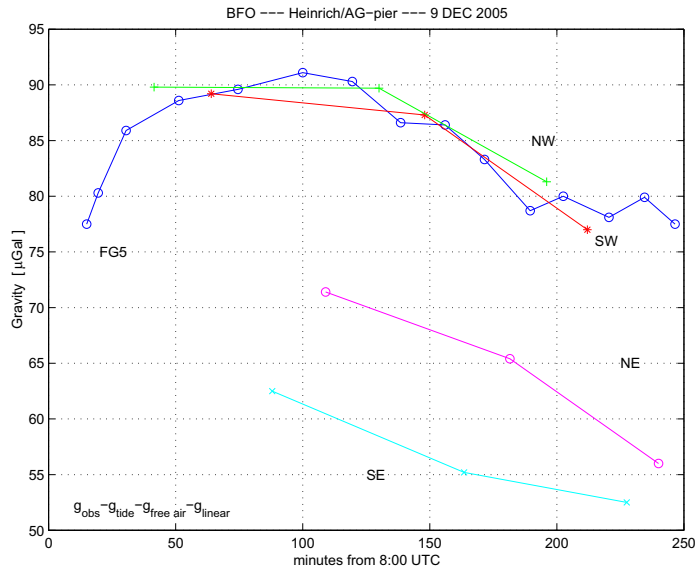


Abb. 3-3: Ergebnis der Untersuchung zum Einfluss des Horizontalgradienten der Schwere. Die Punkte NW, SW, NE, SE liegen auf den Ecken des Absolutschweresockels, ca. 60 cm vom Zentralpunkt FG5 entfernt. Punkte nahe der Felswand (NE, SE) zeigen signifikante Abweichungen vom Messwert auf FG5.

Funktionalitäten von GRAV findet sich in [Rauber, 1993] und [Finkbohner, 1996]. Das Programm verfährt nach dem „ Δg -Prinzip“, d. h. es werden Schweredifferenzen ausgeglichen. Dieser Ansatz hat den Vorteil, dass eine aufwändige Modellierung der Gravimeterdrift entfallen kann, da die Drift zwischen zwei unmittelbar aufeinander folgenden Messungen i. A. durch einen linearen Term befriedigend angenähert werden kann. Der Nachteil ist, dass die als Quasibeobachtungen eingehenden Schweredifferenzen nicht mehr unabhängig voneinander sind.

Für die Auswertung wurde ein mehrstufiges Schema angewendet, das auf die Bestimmung von Schwereänderungen am Punkt FG5 relativ zu den Punkten P3 und MG1 bis MG4 („Referenznetz“) ausgerichtet ist. Orientierung und Maßstab des Schwerenetzes werden über die Absolutschweremessung am 16.04.2008 und die Hersteller-Eichtabellen sowie die für jedes Gravimeter bekannten Verbesserungen zu den linearen Eichfunktionstermen (siehe Tab. 3-2) festgelegt. Damit wird der Maßstab der Eichlinien Hornsgründe und Hannover (LCR-G085) in das BFO-Mikroschwerenetz übertragen.

4.2 Stufe 1: Erkennung von groben Fehlern

Da GRAV eine präzise Erdzeitenreduktion mit wählbaren Eingangsparametern durchführt, wurde die entsprechende interne Korrekturfunktion des Scintrex-CG3 Gravimeters ausgeschaltet. Alle Daten wurden zunächst in das Eingabeformat von GRAV umformatiert. Anschließend wurden mit dem MATLAB Programm SVDDDRIFT die Messungen für jede einzelne Kampagne dargestellt. In diesem ersten Korrekturschritt können grobe Fehler, Ausreißer und Sprünge erkannt und beseitigt bzw. markiert werden. Um weitere grobe Fehler in den Datensätzen zu detektieren, wurde im nächsten Schritt für jede Messkampagne und jedes Gravimeter eine freie Netzausgleichung durchgeführt. Schweredifferenzen, deren Residuen um mehr als das zweifache der a priori Standardabweichung von $10 \mu\text{Gal}$ lagen, wurden nach Möglichkeit ebenfalls aus den Eingangsdaten eliminiert und ein weiterer Programmdurchlauf gestartet. Insgesamt wurden auf diese Weise zwischen 6% (LCR-G686) und 18% (Scintrex-CG5) der Daten als möglicherweise

fehlerhaft gekennzeichnet. Mit einer Ausnahme (LCR156, 24.03.2006) wurden für alle Gravimeter und Einzelkampagnen befriedigende Lösungen mit mittleren Standardabweichungen zwischen $1.7 \mu\text{Gal}$ und $3.8 \mu\text{Gal}$ erhalten.

4.3 Stufe 2: Bestimmung der Schwerewerte für das Referenznetz

Das Ziel der nächsten Auswertestufe war die Zuordnung von Schwerewerten zu den Punkten des Referenznetzes. Dazu wurden alle Beobachtungen am Punkt FG5 aus den Eingangsdaten entfernt und für die verbleibenden Punkte im Zuge einer freien Netzausgleichung eine gemeinsame Lösung aus allen Kampagnen berechnet. In einem Zwischenschritt wurde dies zunächst für jedes der beteiligten Gravimeter getrennt durchgeführt. Dadurch ergab sich eine Möglichkeit, die Qualität der Gravimeter untereinander zu vergleichen. Dabei springen sofort die Schwierigkeiten mit LCR-G156 ins Auge. Das Histogramm der Residuen für dieses Gravimeter ist weit entfernt von einer Normalverteilung; die Standardabweichung m_0 einer einzelnen beobachteten Schweredifferenz ist mit $17.1 \mu\text{Gal}$ doppelt so hoch wie für die anderen Gravimeter (Abb.4-1). Im Gegensatz zu den anderen drei Gravimetern treten bei der Kombination der bereinigten Einzelkampagnen häufig Schweredifferenzen auf, die über dem Zwei- und Dreifachen der a priori Standardabweichung liegen. Die Kampagnenlösungen für LCR156 weichen demnach stark voneinander ab, was ein Hinweis auf instrumentelle Probleme sein könnte. Auf eine Eliminierung dieser groben Fehler wurde verzichtet, weil dies bedeutet hätte, ganze Messkampagnen unberücksichtigt zu lassen. Trotz dieser Schwierigkeiten sind die ausgeglichenen Punktschwerewerte der Gesamtlösung für LCR-G156 bei einer mittleren Standardabweichung von $2.4 \mu\text{Gal}$ mit den anderen Gravimetern durchaus vergleichbar.

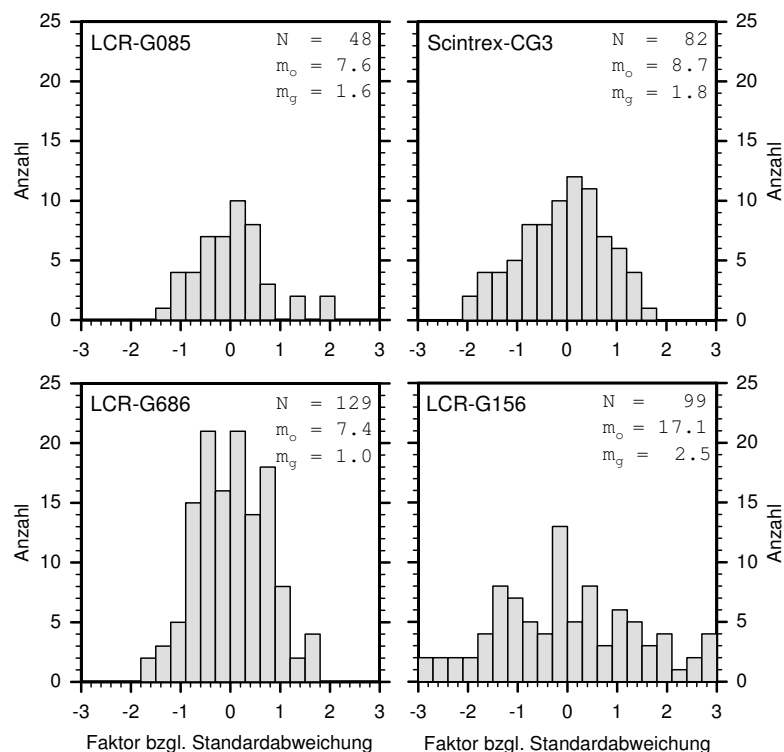


Abb. 4-1: Histogramme der Residuen nach freier Ausgleichung aller Messungen eines Gravimeters auf den Punkten P 3 und MG1 bis MG4. Die x-Achse gibt die Streuung als Vielfaches der a priori Standardabweichung von $10 \mu\text{Gal}$ an. m_0 ist die Standardabweichung einer einzelnen Messung, m_g die mittlere Standardabweichung der ausgeglichenen Punktschwerewerte.

Für den weiteren Vergleich wurden die erhaltenen Punktschwerewerte für G085 von den Ergebnissen der anderen drei Gravimeter abgezogen. Dabei zeigt sich eine recht gute Übereinstimmung zwischen G085 und Scintrex-CG3 (Abb.4-2). Ein leichter Trend vom größten (P3) bis zum niedrigsten Schwerewert (MG4) kann, zumindest für den hinteren Teil des Stollens, mit einem Maßstabeffekt erklärt werden. Überraschend ist dagegen der starke Trend von ca. $20 \mu\text{Gal}$ für LCR-G686. Da sowohl der Maßstab von G686 als auch vom Scintrex-CG3 auf der Eichlinie Hornisgrinde überprüft und in der Ausgleichung berücksichtigt wurde, hätte man ein gleichartiges Verhalten beider Gravimeter über das BFO-Netz hinweg erwartet. Bemerkenswert ist auch das ähnliche Verhalten der beiden nicht mit Feedback ausgerüsteten Gravimeter G686 und G156 mit deutlichen Abweichungen um $\pm 10 \mu\text{Gal}$ auf allen Punkten außer MG3. Eine mögliche Erklärung für dieses Verhalten könnten nicht modellierte Systematiken wie z.B. unzureichend bekannte Spindelfehler sein. Da die Messungen mit G156 und G686 aber über einen sehr viel längeren Zeitraum stattfanden als mit den anderen beiden Gravimetern kann nicht ausgeschlossen werden, dass sich auch zeitliche Schwereeffekte in den Abweichungen manifestieren.

Da die wahre Ursache der beobachteten Unterschiede nicht bekannt ist, wurde im letzten Schritt dieser Auswertestufe durch freie Netzausgleichung eine gemeinsame Lösung für alle Gravimeter berechnet. Durch die Kombination der vier Gravimeter können realitätsnahe Aussagen über die Schwereunterschiede im BFO-Netz und ihre Genauigkeiten erwartet werden. 358 Schwereunterschiede gehen in diese Ausgleichung ein; es ergeben sich Werte von $11.7 \mu\text{Gal}$ für die Standardabweichung einer einzelnen Messung und $1.0 \mu\text{Gal}$ für die mittlere Standardabweichung der Punktschwerewerte. Da sich die Messungen mit LCR-G686 und G156 über einen längeren Zeitraum erstrecken, können zeitliche Schwerevariationen in das Referenznetz eingebracht worden sein, deren Aufdeckung jedoch nicht das Ziel des hier vorgestellten Auswertungsansatzes ist.

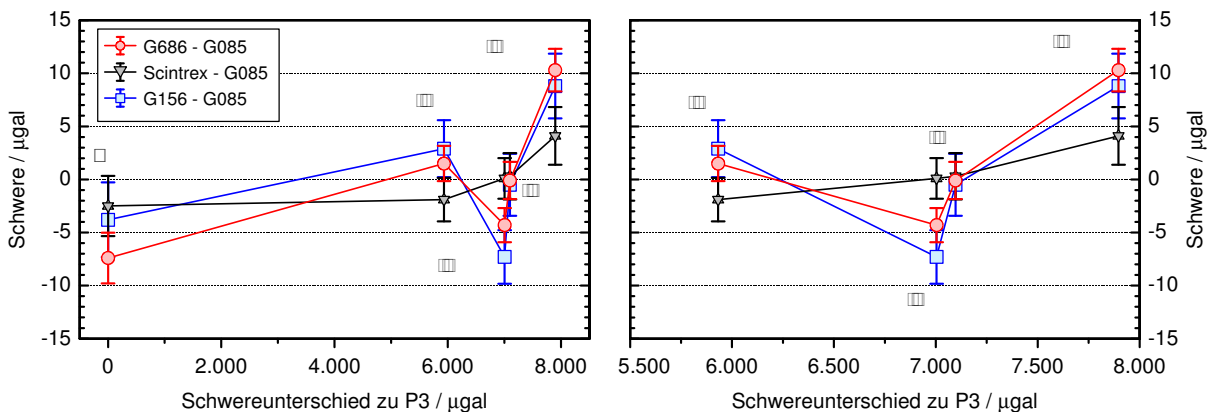


Abb. 4-2: Vergleich der Ergebnisse einer freien Netzausgleichung ohne Punkt FG5 für die einzelnen Gravimeter. Oben: Netzwerk incl. P3; Rechts: Ausschnitt für die Punkte MG1 bis MG4. Dargestellt sind die Differenzen der Ergebnisse zur Lösung für LCR-G085 als Funktion der mittleren, mit G085 gemessenen Schwerunterschiede im Netz. Während sich zwischen Scintrex-CG3 und LCR-G085 nur geringe Unterschiede ergeben, die zumindest im hinteren Teil des Netzes durch einen Maßstabsfaktor erklärt werden können, zeigen LCR-G156 und G686 parallele Abweichungen von bis zu $\pm 10 \mu\text{Gal}$.

4.4 Stufe 3: Überprüfung der Stabilität von Punkt FG5

In einem dynamischen Ausgleichungsansatz werden nun die vorstehend erhaltenen Schwerewerte für die Punkte P3 und MG1 bis MG4 zusammen mit ihren Standardabweichungen als bekannte Anschlusspunkte in die Ausgleichung eingeführt. Die Messungen auf FG5 werden wieder in die

Eingangsdatensätze eingefügt, und für jede einzelne Messkampagne mit LCR-G156 und LCR-G686 wird ein Schwerewert für Punkt FG5 bestimmt. Die Standardabweichung für die ausgeglichene Schwere auf FG5 variiert zwischen $5.4 \mu\text{Gal}$ und $1.9 \mu\text{Gal}$ für G686 sowie $7.4 \mu\text{Gal}$ und $4.8 \mu\text{Gal}$ für G156. Die im Vergleich zur freien Ausgleichung deutlich schlechteren Werte für G156 sind die Konsequenz der erwähnten Spannungen zwischen den einzelnen Kampagnenlösungen für dieses Gravimeter bzw. zwischen den Kampagnenlösungen und der Gesamtnetzausgleichung.

5 Diskussion und Fazit

Abb. 5-1 gibt einen Überblick über die Wiederholungsmessungen auf dem Absolutschweremesspunkt FG5 mit Relativ- und Absolutgravimetern. Dargestellt sind scheinbare zeitliche Schwereänderungen, bezogen auf den 16.04.2008 für die Absolut- und den 23.04.2008 für die Relativmessungen. Das Bezugsdatum wurde gewählt, weil innerhalb der kurzen Zeitspanne von einer Woche starke Schwereänderungen nicht sehr wahrscheinlich sind. Als gemeinsames Faktum der drei Gravimetermessungen lässt sich ein Pendeln zwischen jeweils zwei verschiedenen Niveaus feststellen. Bei den Absolutschweremessungen liegen diese Niveaus ca. $4 \mu\text{Gal}$ auseinander, mit Ausnahme der ersten Messung im März 2001, welche letztlich die vorliegende Studie ausgelöst hat. Im Hinblick auf die erwartete Genauigkeit einer einzelnen Absolutmesskampagne von $< \pm 3 \mu\text{Gal}$ ist die Schwerevariation nach 2003 nicht signifikant und kann möglicherweise auf den Einsatz verschiedener Instrumente und Messstrategien der beteiligten Institutionen zurückzuführen sein.

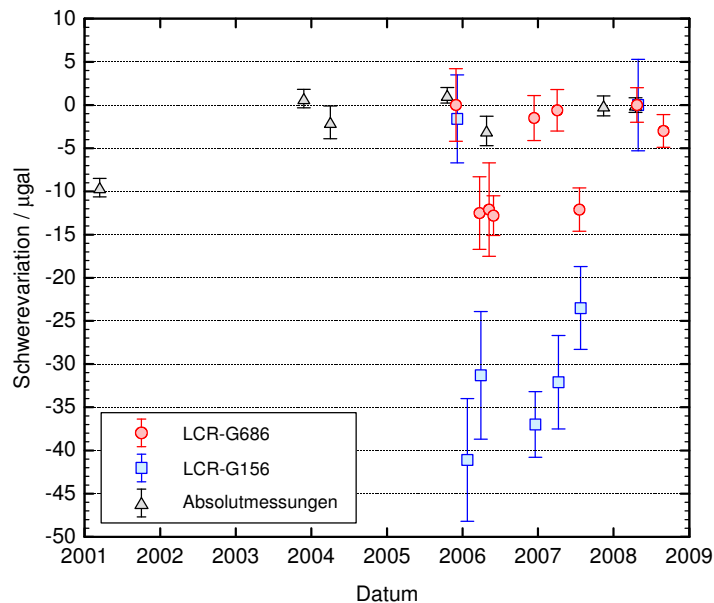


Abb. 5-1: Scheinbare zeitliche Schwerevariationen auf dem Absolutschweresockel des BFO (Netzpunkt FG5). Die Werte für die Relativgravimeter LCR-G686 und LCR-G156 sind das Resultat einer dynamischen Ausgleichung der eintägigen Messkampagnen, bezogen auf die Kampagne am 23.04.2008. Referenzepoche für die Absolutschweremessungen ist der 16.04.2008.

Die Messungen mit LCR-G686 schwanken um ca. $13 \mu\text{Gal}$. Deutlich zu erkennen ist die Verbesserung der inneren Genauigkeit der Messkampagnen durch das geänderte Beobachtungsschema in den Jahren 2007 und 2008. In diesem Zeitraum sind die beobachteten Schwerevariationen größer als das Zweifache der Standardabweichung. Die mit LCR-G156 erhobenen Messungen bewegen sich auf zwei ca. $35 \mu\text{Gal}$ auseinander liegenden Niveaus. In Anbetracht der großen Standardabweichungen sowie der vorstehend erläuterten Auffälligkeiten kann dieses Gravimeter

bei der Frage nach der zeitlichen Stabilität des Messpunktes FG5 sicherlich nicht weiterhelfen. Interessant ist immerhin, dass die erste und letzte Messkampagne der beiden LCR-Gravimeter fast identische Werte liefert; in beiden Fällen handelt es sich um die jeweils größten Messwerte während des gesamten Messzeitraums.

Über die Ursachen für die scheinbaren Schwereänderungen sind zur Zeit keine gesicherten Aussagen möglich. Es fällt auf, dass, mit Ausnahme der Referenzepoche im April 2008, die großen Schwerewerte für LCR-G686 und die FG5-Absolutmessungen jeweils im Winter beobachtet werden, während die niedrigen Schwerewerte auf den Frühsommer fallen. Dies könnte auf hydrologische Einflüsse schließen lassen. Tatsächlich lässt sich die Absolutschwerekurve gut mit allgemeinen Niederschlags- und Grundwasserkurven in Übereinstimmung bringen (M. van Camp, pers. Mittlg. 2009). Zu erklären wäre dann jedoch, warum sich die absolute Schwere lediglich um $4 \mu\text{Gal}$ ändert, während G686 im gleichen Zeitraum (Winter 2005 – Frühsommer 2006) eine Schwereabnahme um $13 \mu\text{Gal}$ detektiert.

Auf Basis des gegenwärtigen Kenntnisstandes können nicht bekannte bzw. nicht modellierte Effekte durch Instrumente und Messablauf keinesfalls ausgeschlossen werden. Dies gilt sowohl für die Absolut- als auch die Relativschweremessungen. Die Ergebnisse der Relativmessungen lassen insgesamt eher auf systematische als auf zufällige Einflüsse schließen. In Frage kommen unter anderem nicht bekannte oder falsch angesetzte Spindelfehler. Die Veränderung des Skaleneinheiten-Niveaus zwischen den Messkampagnen passt allerdings nicht zu den für diesen Gravimetertyp bekannten Periodizitäten. Auch müssten die Amplituden außergewöhnlich groß sein. Ein Beitrag durch lokale Variationen des vertikalen Schweregradienten ist theoretisch möglich; in Unkenntnis des tatsächlichen Gradienten an jedem Messpunkt können dazu derzeit keine konkreten Aussagen getroffen werden. Ein Einfluss des horizontalen Gradienten und des Erdmagnetfeldes in der beobachteten Größenordnung $> 10 \mu\text{Gal}$ kann nach den Voruntersuchungen ausgeschlossen werden.

Zusammenfassend muss man konstatieren, dass die Genauigkeit der eingesetzten LCR-Gravimeter geringer ist als diejenige der FG5 Gravimeter. Damit ist es nicht möglich, auf Basis dieser Messungen Aussagen über die Qualität der Absolutschweremessungen oder die zeitliche Stabilität des Messpunktes FG5 zu treffen. LCR-G686 erreicht bei ganztägigen Messkampagnen (Anfahrt am Vortag) mit einer ca. 5-fachen Besetzung der Netzpunkte eine den Absolutgravimetern vergleichbare innere Genauigkeit von $\pm 2.5 \mu\text{Gal}$; nach dem derzeitigen Diskussionsstand muss man allerdings von einer Wiederholbarkeit von lediglich $\pm 7 \mu\text{Gal}$ ausgehen. Nimmt man an, dass die Messungen mit den FG5-Absolutgravimetern um den wahren Schwerewert streuen, wäre dies auch ein Maß für die äußere Genauigkeit von LCR-G686. Mit Variationen von bis zu $40 \mu\text{Gal}$ zwischen den Kampagnen ist LCR-G156 sicherlich nicht in einem Zustand, der für Präzisionsschweremessungen ausreicht. Langfristige Schwereänderungen am Absolutschweresockel können auf Basis des Beobachtungsmaterials aller Gravimeter von 2001 bis 2008 ausgeschlossen werden. Die Frage nach dem Einfluss hydrologischer Signale im BFO-Stollen wird erst mit Hilfe des seit September 2009 registrierenden Supraleitenden Gravimeters am BFO beantwortet werden können.

Literatur

- [Berardino et al. 2002] BERARDINO, P. ; FORNARO, G. ; LANARI, R. ; SANSOSTI, E: A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002 (40), S. 2375–2383
- [Finkbohner 1996] FINKBOHNER, S.: *Das Gravimeter-Eichsystem Karlsruhe (GESK), als Vereinigung der Gravimeteereichlinien in Karlsruhe (GEK) und an der Hornisgrinde (GEH)*, Geodätisches Institut der Universität Karlsruhe (TH), Diplomarbeit, 1996
- [Forbriger 2007] FORBRIGER, T.: Reducing magnetic field induced noise in broad-band seismic recordings. In: *Geophysical Journal International*, 2007 (Band 169), S. 240–258. – doi: 10.1111/j.1365-246X.2006.03295.x
- [Francis 2005] FRANCIS, O. (insgesamt 29 Autoren): Results of the International Comparison of the Absolute Gravimeters in Walferdange (Luxembourg) of November 2003. In: JEKELI, C. (Hrsg.) ; BASTOS, L. (Hrsg.) ; FERNANDES, J. (Hrsg.): *Gravity, Geoid and Space Missions, GGSM 2004, IAG Symposium* Bd. 129, 2005, S. 272–275
- [Naujoks et al. 2008] NAUJOKS, M. ; WEISE, A. ; KRONER, C. ; JAHR, T.: Detection of small hydrological variations in gravity by repeated observations with relative gravimeters. In: *Journal of Geodesy* 82 (2008), S. 543–553. – doi:10.1007/s00190-007-0202-9
- [Rauber 1993] RAUBER, W.: *Anlage einer Gravimeter-Eichlinie in Karlsruhe*, Geodätisches Institut der Universität Karlsruhe (TH), Diplomarbeit, 1993
- [Torge 1989] TORGE, W.: *Gravimetry*. Berlin, New York : de Gruyter, 1989
- [Watermann 1957] WATERMANN, H.: *Reihe C. Bd. 21: Über systematische Fehler bei Gravimetermessungen*. DGK, 1957
- [Wöllner 2007] WÖLLNER, J.: *Hochgenaue Bestimmung von Schwereunterschieden an 7 Punkten im BFO-Stollen mit dem Scintrex CG3 Gravimeter*, Geodätisches Institut der Universität Karlsruhe (TH), Studienarbeit, 2007

Anschrift der Autoren:

Dr.rer.nat. Malte Westerhaus Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Geodätisches Institut (GIK)
Englerstraße 7, 76131 Karlsruhe
malte.westerhaus@kit.edu

Dr.-Ing. Klaus Lindner Im Speitel 49a, 76229 Karlsruhe
lindner@gik.uni-karlsruhe.de

Dr.rer.nat. Walter Zürn Geowissenschaftliches Gemeinschaftsobservato-
Peter Duffner rium des KIT und der Universität Stuttgart
Dr.rer.nat. Thomas Forbriger Black Forest Observatory
Dr.rer.nat. Heubach 206, 77709 Wolfach
Rudolf Widmer-Schnidrig walter.zuern@gpi.uni-karlsruhe.de