

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich

Institut für Geodäsie
und Photogrammetrie

Bericht

241

Bestimmung der Gravitationskonstanten G in der Staumauer Gigerwald

F. Amet
E. Klingelé
Ch. Staub

Januar 1995

Anmerkung des Herausgebers

Die Beiträge, die in der Schriftenreihe "Berichte des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie" erscheinen, dienen vor allem dem Unterricht und der Dokumentation. Sie sind deshalb in erster Linie für Mitarbeiter des Instituts und für Studenten bestimmt. Einzelne Hefte können auch einem weiteren Kreis von Interessenten zur Verfügung gestellt werden. Die Auflage ist auf den besonderen Zweck des Heftes abgestimmt.

IGP Bericht Nr. 241

Bestimmung der Gravitationskonstanten G in der Staumauer
Gigerwald

F. Arnet, E. Klingelé, Ch. Staub

© 1995
Institut für Geodäsie und Photogrammetrie
an der Eidg. Technischen Hochschule Zürich

Alle Rechte vorbehalten

ISBN 3-906513-62-9

VORWORT

Nach Newton's Gravitationsgesetz ist die Schwerkraft zwischen zwei Massen proportional zu ihrem Produkt und umgekehrt proportional zum Quadrat ihrer Entfernung, multipliziert mit der universellen Gravitationskonstanten G. Die ersten experimentellen G-Bestimmungen gehen auf Drehwaagemessungen von CAVENDISH [1798], REICH [1838] und BAILY [1842] zurück. Das Messprinzip bestand darin, zwei gleich grosse Massen an die Enden einer Drehwaage zu bringen. Das dabei auftretende Gravitations-Drehmoment führt zu einer Drehung des Waagebalkens, die durch die Torsionskraft des Torsionsfadens, an dem der Waagebalken befestigt ist, kompensiert wird. Der heutige offizielle Wert von G ist im Geodätischen Referenzsystem (Canberra, 1980) festgelegt worden. Er besagt, dass eine Masse von 1 kg eine zweite Masse von 1 kg, die sich im Abstand 1 m von der ersten befindet, mit der Kraft $6.673 \cdot 10^{-11}$ Newton anzieht. Eine ausführliche Dokumentation zur NEWTON'schen Gravitationskonstante findet man bei GILLIES [1987].

In neuerer Zeit werden jedoch Ansätze publiziert, wonach die gravitative Kopplung abstandsabhängig sein könnte. Man nimmt heute an, dass die gravitative Wechselwirkung durch den Austausch von Feldquanten der Schwerkraft, den Gravitonen, zustande kommt. Einige Physiker vermuten nun, dass die Feldquanten von anderen Wechselwirkungen, z.B. der elektromagnetischen, die Gravitonen beeinflussen und die Gravitationskraft damit sogenannte Nicht-Newton'sche Anteile enthalten könnte [STACEY et al., 1988]. Diese Vermutung kam auf, als die früheren Experimente des ungarischen Barons EÖTVÖS [1922] neu ausgewertet wurden [s.z.B. FISCHBACH et al., 1986].

Im vorliegenden Bericht wird ein Experiment beschrieben, das seit einigen Jahren von Geodäsie-StudentInnen beim Stausee Gigerwald, Calfeisental, im Rahmen von Vertiefungsblöcken ausgeführt wird. Die Idee besteht darin, die Gravitationsunterschiede von genau definierten Wasserstandsänderungen des Stausees einerseits mit Hochpräzisions-Gravimetren zu messen und andererseits zu modellieren. Daraus kann ein sehr genauer Wert der Gravitationskonstanten in Abhängigkeit von der anziehenden Wassermasse bestimmt werden.

Besonderer Dank gebührt Herrn Prof. Dr. E. Klingelé, der dieses interessante Thema aufgegriffen und realisiert hat. Herr Dipl.Verm.Ing. F. Arnet war einer der ersten Studenten, der mit Ideenreichtum und viel Improvisierung den Grundstein für den Versuchsaufbau gelegt hat. Ein weiterer begeisteter Gravimetriker war Herr Dipl. Verm. Ing. Ch. Straub, dessen Ergebnisse ebenfalls in diesem Bericht integriert sind. Die vorliegende Dokumentation enthält eine Zusammenfassung aller bisher ausgeführter Arbeiten. Die Autoren leisten damit einen wertvollen Beitrag zur Brückenbildung zwischen der Geodäsie und Geophysik.

Den zuständigen Stellen der Kraftwerke Sarganserland AG und des Stausees Gigerwald danken wir für ihre wertvolle Unterstützung, ohne die die Messungen nicht möglich gewesen wären.

Prof. Dr. H.-G. Kahle
GGL-IGP-ETHZ
Dez. 1994

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Zusammenfassung | 1 |
| 1. Einleitung | 2 |
| 2. Physikalische Modelle | 3 |
| 2.1 Das Newtonsche Gravitationsgesetz | 3 |
| 2.2 Die fünfte Kraft | 3 |
| 3. Beschreibung des Experiments | 6 |
| 4. Messinstrumente | 7 |
| 4.1 LaCoste-Romberg Gravimeter und deren Überprüfung | 7 |
| 4.1.1 Justierung der Libellen | 9 |
| 4.2 Gezeitenreduktionen | 9 |
| 4.3 Angriffspunkt der Schwere im Gravimeter | 10 |
| 5. Der Störkörper | 13 |
| 5.1 Der Gigerwaldsee | 13 |
| 5.1.1 Die Seeform | 14 |
| 5.2 Messstationen | 15 |
| 5.3 Annäherung der Seeform mit Polyedern | 16 |
| 5.4 Berechnung des Schwereeffekts eines Polyeders allgemeiner Form | 17 |
| 6. Messungen am Staausee | 19 |
| 7. Resultate | 21 |
| 7.1 Gewichtung der Messergebnisse | 21 |
| 7.2 Resultate | 22 |
| 8. Fehlerabschätzung | 24 |
| 9. Schlussbemerkungen | 27 |
| Literaturverzeichnis | 28 |
| Anhang A : Definition der Staumauer | 30 |
| Anhang B : Punktkoordinaten | 31 |
| Anhang C : Lotabweichungen infolge Wasserspiegel des Sees | 32 |
| Anhang D : Gravimetrische Messungen | 34 |
| Anhang E : Messungen zum geodätischen Einmessen der Gravimeterstationen | 43 |

Bestimmung der Gravitationskonstante G in der Staumauer Gigerwald

Zusammenfassung

Am Stausee Gigerwald, Kanton St. Gallen, wurde die Gravitationskonstante G bestimmt. Zu diesem Zweck wurden bis zu drei LaCoste&Romberg Modell G und D Gravimeter gleichzeitig eingesetzt. Gemessen wurde die Schweredifferenz zwischen zwei Stationen in der Staumauer des Sees, die einen Höhenunterschied von 90 m aufweisen. Wasserstandsänderungen bis zu 70 m verursachten Schwereänderungen bis $1600 \mu\text{gal}$ ($1 \mu\text{gal} = 10^{-8} \text{ m s}^{-2}$), welche mit einer Genauigkeit von $\approx 10 \mu\text{gal}$ gemessen werden konnten. Daraus konnte die Gravitationskonstante auf $G = (6.670 \pm 0.038) \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-2}$ bestimmt werden. Dieser Wert liegt im Bereich des Laborwerts für G.

$$\frac{\Delta g}{g} = 0.0057 = 5700 \text{ ppm}$$

1. Einleitung

Im Vertiefungsblock Geodäsie/Geophysik der Abteilung für Kulturtechnik und Vermessung wurde in den letzten Jahren wiederholt ein Thema angeboten, das sich mit der Bestimmung der Gravitationskonstanten G befasst. Das Ziel war jeweils, aus Schweremessungen, die in der Staumauer Gigerwald (Calfeisental, SG) durchgeführt wurden, G zu bestimmen.

Die Staumauer Gigerwald ist 100 m hoch, und der See weist saisonal eine relativ hohe Änderung des Wasserspiegels auf (50 m). Dies sind gute Voraussetzungen, um Werte für G zu bestimmen. Weiter liegt der See mit zweieinhalb Stunden Fahrzeit von Zürich her innerhalb der Reichweite von der ETH.

Die Schwerpunkte der Vertiefungsblöcke wurden jeweils anders gewählt. So stand 1989 im Vordergrund, zunächst alle Grundlagen für die Berechnung von G zu schaffen. Dazu gehörten neben Schweremessungen auch das Einmessen der gravimetrischen Messstationen. 1990 wurde die genaue Digitalisierung des Sees durchgeführt. Zudem wurde stärker auf die Handhabung der Instrumente geachtet. Erstmals wurden dann an der ETH Zürich Messungen mit einem Gravimeter durchgeführt, das mit einem Feedbacksystem ausgerüstet war. Ein weiterer Schwerpunkt war die Untersuchung, ob G eine universelle Konstante darstellt, oder ob sie distanzabhängig ist.

1992 wurde von der Universität Zürich (Cornaz et al., 1993) eine Hochpräzisionswaage in der Staumauer eingerichtet. Dabei halfen zum Teil auch Assistenten der ETH mit. Zudem wurden Vorarbeiten zur Digitalisierung des Stausees wurden übernommen. Die Resultate der Messungen in diesem Experiment gehören zu den genauesten Bestimmungen von G ausserhalb des Labors. Dies ist ein weiterer guter Hinweis darauf, dass der Gigerwaldsee eine ausgezeichnete Möglichkeit bietet, G zu bestimmen.

Beweggründe, um dieses Thema in einem Vertiefungsblock zu bearbeiten, mögen verschiedene gewesen sein. Sicher war ein wissenschaftlicher Anreiz gegeben, etwas Universelles zu bestimmen. Weiter ist das Ziel eines Vertiefungsblockes nicht unbedingt die Handhabung oder Perfektionierung im Umgang mit Vermessungsinstrumenten, sondern ebenso selbständiges Planen und Ausführen von Arbeiten. Wohl auch ein Grund waren im allgemeinen die Messtage im schönen Gelände des Sees, was eine willkommene Abwechslung zum Alltag am Hönggerberg darstellte.

2. Physikalische Modelle

Das Ziel unserer Messungen in der Staumauer von Gigerwald war es, die Gravitationskonstante G des Newtonschen Gravitationsgesetzes zu bestimmen. In den letzten Jahren wurden immer wieder Versuche unternommen, um Abweichungen von diesem Gesetz festzustellen und die sogenannte fünfte Kraft nachzuweisen. Bei signifikanter Abweichung des von uns bestimmten G vom gängigen G wäre es daher reizvoll, über die sogenannte fünfte Kraft nachzudenken.

2.1 Das Newtonsche Gravitationsgesetz

Das Newtonsche Gravitationsgesetz beschreibt die Kraft, welche eine Punktmasse auf eine andere auswirkt.

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad \text{oder} \quad g = G \frac{m}{r^2} \quad [2.1]$$

| | | |
|-----|------------|-------------------------------------|
| mit | F | : Kraft |
| | G | : Universelle Gravitationskonstante |
| | g | : Schwerkraftbeschleunigung |
| | m_1, m_2 | : Punktmassen |
| | r | : Abstand der zwei Massen |

Dabei wird angenommen, dass die universelle Gravitationskonstante G unabhängig von anderen physikalischen Größen ist. Der aktuelle Laborwert für die Gravitationskonstante ist :

$$G_{\text{lab}} = 6.6726 \pm 0.0005 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2} \quad (\text{Luther \& Towler 1982})$$

$$\frac{\delta G}{G} \approx 7.5 \cdot 10^{-5}$$

2.2 Die fünfte Kraft

Der Geophysiker Stacey postulierte 1981 ein fünftes Grundkraft (Stacey, 1984): Bei seinen Messungen ergaben sich konsistente Abweichungen vom Newtonschen Gravitationsgesetz.

Zunächst wurden diese Resultate in der Physikerwelt als Kuriosum betrachtet. Doch allmählich machten sich immer mehr Forschergruppen auf der ganzen Welt daran, die These der fünften Kraft zu untersuchen. Bis heute sind allerdings alle Versuche gescheitert, eine signifikante Abweichung vom Newtonschen Gesetz nachzuweisen.

Da es sich bei der fünften Kraft um eine zusätzliche distanzabhängige Gravitationskomponente handeln soll, wurden vor allem Bohrlöcher und Türme als Versuchsstätten benutzt. Das grosse Problem bei allen diesen Versuchsanordnungen waren jedoch die kaum exakt zu bestimmenden Einflüsse der Gesteinsdichten

in der Nähe des Versuchsortes. Kleine Abweichungen in Form oder Dichte können schon dazu führen, dass das Experiment scheitert.

Neuere Versuchsanordnungen tragen diesem Umstand Rechnung. So werden vor und nach dem Bau neuer Minen Schweremessungen vorgenommen. Die Dichte und Form des abgetragenen Materials kann dabei bestimmt werden. Eleganter sind Messungen an Stauseen. Änderungen des Wasserspiegels ergeben Massenänderungen, die genau bestimmt werden können. Weiter ist die Dichte relativ einfach bestimmbar,

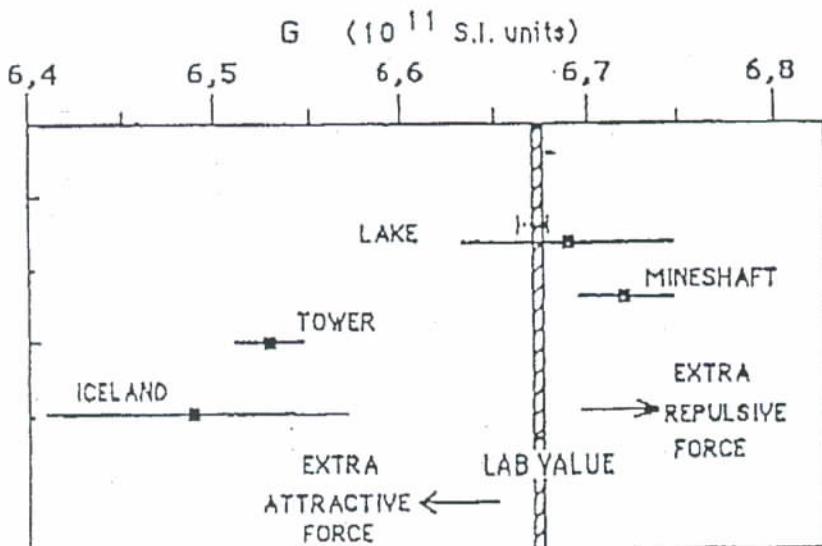


Fig 2.2 : Verschiedene Resultate für G (Palmonari et. al 1989)

Auch im Bereich der Teilchenphysik sollen Experimente zur Überprüfung des Newtonschen Gravitationsgesetzes durchgeführt werden. Am CERN bei Genf werden zum Beispiel Fallversuche mit Protonen und Antiprotonen gemacht. Sollte es eine fünfte Kraft geben, so müssten die Teilchen unterschiedliche Beschleunigungen erhalten.

Das Graviton ist das letzte Wechselwirkungsteilchen, das noch nicht gefunden wurde. Es wird zudem erwartet, dass das Graviton total andere Eigenschaften (z.B. Spin ≠ 1) besitzt als alle anderen. Auf jeden Fall birgt die Gravitation noch Geheimnisse in sich. Eines davon ist die Frage, ob man überhaupt von einer einzigen Kraft sprechen kann. Weiter muss noch erwähnt werden, dass auch von einer Materialabhängigkeit der Gravitation gesprochen wird.

Die meist diskutierte Erweiterung der Gravitationskonstante sieht folgendermassen aus:

$$G(r) = \gamma \left(1 + \alpha \left(1 + \frac{r}{\lambda} \right) e^{-r/\lambda} \right) \quad [2.3]$$

mit γ : universelle Gravitationskonstante
 α : Grösse der fünften Kraft

λ

: charakteristische Reichweite der fünften Kraft

Mit diesem Ansatz wird $G(r \rightarrow \infty) = G$ und $G(0) = \gamma(1 + \alpha)$.

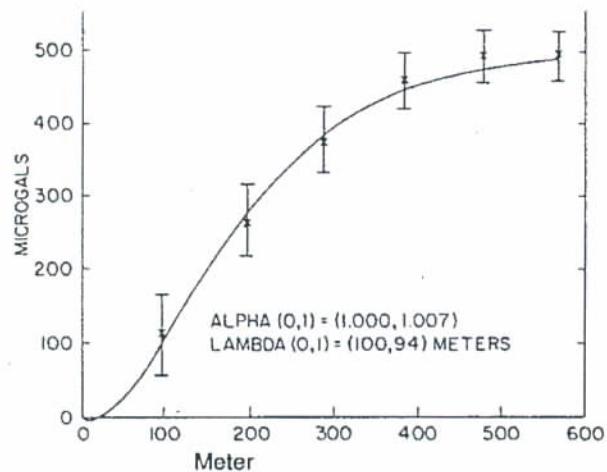


Fig 2.3 : Distanzabhängigkeit von G nach Yukawa (Zürn et al., 1990)

3. Beschreibung des Experiments

An der Staumauer Gigerwald kann G mit folgenden Überlegungen bestimmt werden :

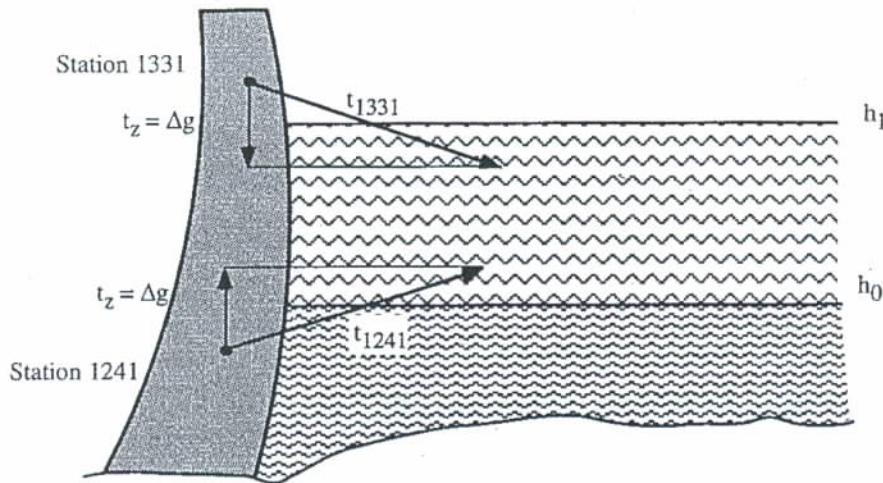


Fig 3.1 : Schematische Darstellung der Wirkung der Störkörper in der Staumauer Gigerwald

Bei einem Wasserstand von h_0 soll angenommen werden, dass kein Störkörper vorhanden ist. Bei diesem Wasserstand wird die Schweredifferenz $g_{1331,h_0} - g_{1241,h_0}$ zwischen zwei Stationen gemessen und die Störbeschleunigungen sind $t_{1331,h_0} = t_{1241,h_0} = 0$.

Ändert sich der Wasserstand von der Höhe h_0 zu h_1 , so wird die messbare Schweredifferenz zu

$$g_{1331,h_1} - g_{1241,h_1} = (g_{1331,h_0} + t_{z,1331,h_1}) - (g_{1241,h_0} + t_{z,1241,h_1}) \quad [3.1]$$

Vergleicht man die Schweredifferenzen der beiden Wasserstände, ergibt sich

$$(g_{1331,h_1} - g_{1241,h_1}) - (g_{1331,h_0} - g_{1241,h_0}) = t_{z,1331,h_1} - t_{z,1241,h_1} \quad [3.2]$$

Dieser Wert kann also direkt aus den Gravimetermessungen bestimmt werden. Gleichzeitig ist es auch möglich, $t_{z,\text{modell}}$ mit den physikalischen Gesetzen, der Staumauergeometrie und der Lage der Messstationen zu berechnen. Stimmen Modell und Wirklichkeit nicht innerhalb der Fehlergrenzen überein, muss ein Modellfehler vorliegen.

4. Messinstrumente

Um die Gravitationskraft der Erde zu messen, werden Gravimeter eingesetzt. Dabei gibt es zwei grundsätzlich verschiedene Arten von Modellen. Erstens, Absolutgravimeter, die den Betrag der Schwere genau bestimmen. Die heute genauesten absoluten transportablen Absolutgravimeter sind Senkrechtwurf- und Freifallgravimeter, die je eine Genauigkeit von ungefähr 10^{-7} m s^{-2} ($\approx 10 \mu\text{gal}$) aufweisen. Demgegenüber stehen die Relativgravimeter. Die präzisesten sind die supraleitenden Gravimeter mit einer Genauigkeit bis 10^{-9} m s^{-2} . Diese sind allerdings nicht portabel. Zu den genauesten portablen Gravimetern gehören die LaCoste-Romberg Gravimeter, mit denen man Bereiche von $\pm 10^{-7} \text{ m s}^{-2}$ entlösen kann. Für die Messungen im Rahmen des Staumauerexperiments Gigerwald wurden ausschliesslich LaCoste-Romberg Gravimeter eingesetzt.

4.1 LaCoste-Romberg Gravimeter und deren Überprüfung

Das Kernstück von LaCoste-Romberg Gravimetern ist die sogenannte Null-Längen-Feder (zero-length-spring), die sich dadurch auszeichnet, dass sie eine sehr kleine Federkonstante aufweist. Für gewisse Spezialgravimeter wie Seegravimeter ist diese Konstante sogar genau Null, das heisst, es braucht keine Kraft um eine Längenänderung der Feder zu bewirken. In diesem Fall ist es vielmehr so, dass die Geschwindigkeit der Längenänderung der Feder abhängig von der Kraft ist.

Für die Messungen in Gigerwald wurden G- und D- Gravimeter verwendet. Der Aufbau des Kernstücks der beiden Typen ist dabei genau gleich. Der Unterschied der beiden Gravimeter besteht in der Genauigkeit der Messspindel, die bei D-Gravimeter eine zehn mal grössere Auflösung ($\approx 1 \mu\text{gal}$) besitzt als bei den G-Gravimetern ($\approx 10 \mu\text{gal}$). Weiter sind die systematischen Fehler der Messspindel bei den D-Gravimetern bedeutend kleiner ($< 5 \mu\text{gal}$) als bei den G-Gravimetern (bis zu $30 \mu\text{gal}$). Ein weiterer Unterschied ist der Messbereich der beiden Modelle. Der Typ D hat einen Bereich von nur 200 mgal, was ungefähr einer Höhendifferenz von 600 m auf gleicher geographischen Breite entspricht. Ist der Messbereich an einem Ort stark unterschiedlich von demjenigen des Instruments, so kann am Instrument der Bereich verschoben werden, allerdings nur um einen nicht genau bestimmbarer Betrag. Der Messbereich des Typs G beträgt 7000 mgal; dies genügt um auf irgend einem Punkt der Erde eine Ablesung am Instrument durchzuführen. Die Instrumente sind ziemlich empfindlich auf Schläge während des Transportes, so dass im Feldeinsatz, mit Verschiebung der Instrumente über einige zehn Meter oder mehr, die Messgenauigkeit der beiden Typen vergleichbar wird und je nach Instrument stark variieren kann ($< 10 \mu\text{gal}$ bis $30 \mu\text{gal}$).

Eine Ablesung des Gravimeters wird gemacht, wenn sich der Waagebalken in horizontaler Position befindet. Dabei gibt es je nach Instrument verschiedene Ablesemöglichkeiten. Die konventionelle, bei allen LaCoste-Romberg D- und G-Instrumenten verfügbare Methode ist das Einspielen des Messbalkens via Okular. Die Ablesegenauigkeit ist hier bei einem G-Meter $\approx 10 \mu\text{gal}$, bei einem D-Meter $\approx 1 \mu\text{gal}$. Einige Instrumente besitzen zusätzlich ein Galvanometer, das die Lage des Waagebalkens zwischen zwei

Kondensatorplatten angibt. So kann die Ablesegenauigkeit vor allem von G-Metern stark gesteigert werden ($\pm 2 \mu\text{gal}$).

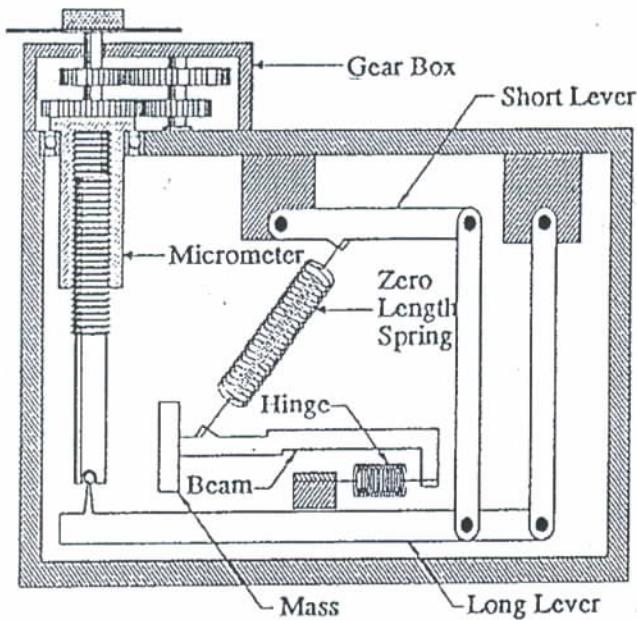


Fig. 4.1. Konstruktionsprinzip von LaCoste-Romberg G- und D-Gravimetern

Weiter gibt es die Möglichkeit, die Instrumente mit einem Feedbacksystem auszurüsten, das den Waagebalken innerhalb eines bestimmten Bereichs selbstständig in die horizontale Lage bringt. Die Schwere ist dann eine Funktion der Ablesung auf dem Instrument und der vom Feedbacksystem benötigten Spannung. Die Genauigkeit hier ist für D- und G-Meter je $\approx 1 \mu\text{gal}$. Ein weiterer Vorteil des Feedbacksystems ist, dass systematische Fehler der Messspindel keine Rolle spielen, sofern sie zwischen zwei Messungen nicht verstellt werden muss. Der Messbereich des Feedbacksystems ohne Veränderung der Messspindel ist allerdings stark eingeschränkt und beträgt im allgemeinen nur rund 10 mgal ($\approx 30 \text{ m Höhenänderung}$).

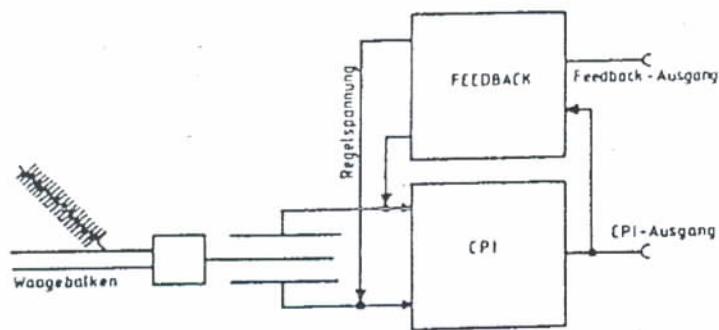


Fig. 4.2 : Schema des Feedbacksystems für LCR-Gravimeter der Universität Hannover

4.1.1 Justierung der Libellen

Mit den Gravimetern werden die Differenzen der Beträge des Totalfeld der Schwere an verschiedenen Messorten betrachtet. Dies ist jedoch nur möglich, wenn das Gerät resp. der Waagebalken genau in einer Ebene senkrecht zur Schwere liegt. Um das zu erreichen, sind die Gravimeter mit je zwei Libellen versehen, mit denen das Gerät horizontiert werden kann. Allerdings braucht es noch eine Überprüfung der Libellen, um die Messfehler möglichst klein zu halten.

Ist das Gerät um den Winkel α aus der Horizontallage gekippt, so misst man einen um $\Delta g = g(1 - \cos(\alpha))$ verfälschten Wert. Durch Annäherung von $\cos(\alpha)$ mit den ersten zwei Termen der Taylorreihe ergibt sich $\Delta g = g \frac{\alpha^2}{2}$. Diese Gleichung stellt eine Parabel dar. Deren Scheitelpunkt ist der gesuchte Spielpunkt der Libelle. Würde man immer mit dem genau gleichen α messen, so wäre Δg konstant und würde bei Relativmessungen also keine Fehler verursachen. Je weiter entfernt man sich jedoch vom tatsächlichen Spielpunkt befindet, desto grösser wird der Einfluss einer kleinen Änderung α auf Δg . Eine Einheit auf einer Libelle entspricht bei allgemeinen LaCoste-Romberg Gravimetern 20 ", das heisst, ein falsche Horizontierung um eine Messlinie verursacht eine falsche Ablesung von 5 μgal im Spielpunkt, jedoch schon 20 μgal , wenn der Spielpunkt um eine Linie falsch bestimmt wurde.

Bei der Justierung der Horizontierung kann entweder der Spielpunkt der Libellen in deren Mitte verschoben oder die Position des Spielpunkts markiert werden.

Die Libellen wurden vor jeder Messkampagne in der Staumauer von Gigerwald geeicht.

4.2 Gezeitenreduktionen

Die Schwerkraftbeschleunigung an einem Punkt auf der Erde ist zeitlich variabel, auch wenn in der Umgebung des Punktes keine Massenänderungen vorkommen. Diese Unterschiede sind auf die Schwerewirkung von Mond und Sonne zurückzuführen und können Beträge von bis zu 200 μgal annehmen, welche deutlich über der Messgenauigkeit der Gravimeter liegen. Deshalb müssen die Messungen um diese Effekte korrigiert werden. Dazu stehen entweder Gezeitentabellen (Geophysical Prospecting : Tidal Gravity Corrections, jährlich herausgegeben) oder Berechnungsalgorithmen (Longman, 1959) zur Verfügung.

Eine weitere Möglichkeit ist, die Gezeitenwirkung direkt an einem stationären Gravimeter zu messen (am einfachsten mit selbstregistrierendem Feedbacksystem) und die Messungen der mobilen Gravimeter um die gemessenen Beträge zu korrigieren. Dies geht natürlich nur soweit, wie man annehmen kann, dass alle verwendeten Gravimeter die gleiche Gezeitenwirkung erfahren. Dies gilt für Distanzen bis zu einigen Kilometern zwischen Referenzstation und mobiler Station. Untersuchungen in Gigerwald ergaben, dass die berechneten Werte nach Longman den beobachteten Gezeitenwirkungen genügend genau entsprechen (< 2 μgal).

4.3 Angriffspunkt der Schwere im Gravimeter

Um den Einfluss von Störkörpern auf das Gravimeter zu berechnen, ist es nötig, die genaue Lage des Instruments gegenüber dem Körper zu kennen. Für unsere Zwecke, der Bestimmung von G, ist es sogar notwendig, den genauen Angriffspunkt der Schwere im Gravimeter zu kennen, so dass der Abstand des Störkörpers gegenüber der Messstation möglichst genau bestimmt ist (< 5 cm).

Dazu muss zunächst einmal bekannt sein, wo der Angriffspunkt im Gravimeter liegt. Dieser befindet sich im Schwerpunkt der Masse am Ende des Waagebalkens. Nahe (< 1 cm) dieser Masse befindet sich auch die Messmarke, die in das Okular gespiegelt wird. Damit liegt der Angriffspunkt senkrecht unter dem Okular. Weiter befindet sich der Waagebalken 13.8 cm unter dem Deckel des Instruments, wie aus Fig 4.3 ersichtlich ist.

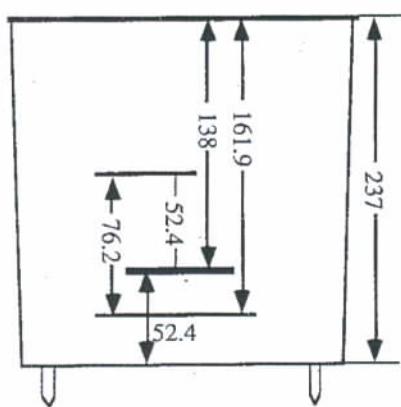


Fig. 4.3 : Ansicht eines LaCoste-Romberg Gravimeters, Modelle G und D, alle Längen in mm.

Beim Gravimeter D-86 wurde die Position des Okulars bezüglich den Fußschrauben mittels Schieblehre exakt (± 0.2 mm) eingemessen, wobei angenommen wurde, dass der Boden des weißen Gehäuses und der schwarze Deckel zwei parallele Rechtecke bilden, deren Schwerpunkte vertikal übereinander liegen.

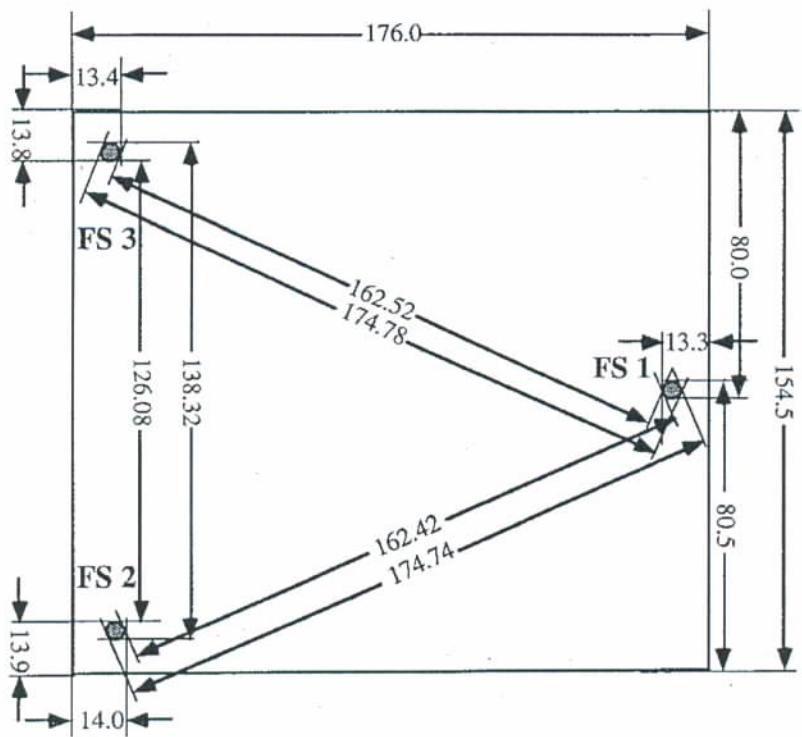


Fig 4.4 Masse des LaCoste Romberg Gravimeters D-86, Boden, Massstab 1 : 2, alle Masse in mm
FS : Fußschraube

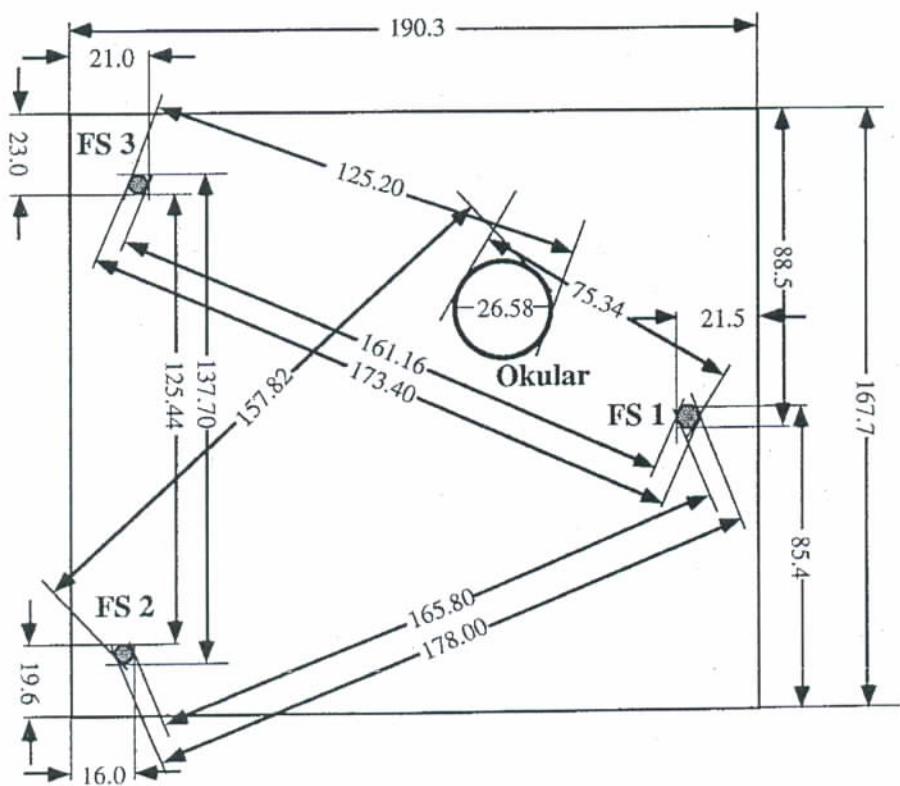


Fig 4.5 Masse des LaCoste Romberg Gravimeters D-86, Deckel, Massstab 1 : 2, alle Masse in mm
FS : Fußschraube

Um die gemessenen Größen des Gravimeters weiter zu verarbeiten, ist es zweckmäßig, ein kartesisches Koordinatensystem einzuführen. Die x-Achse soll dabei parallel zur Längsachse und der Ursprung am unteren Ende der Fussschraube 1 gewählt werden.

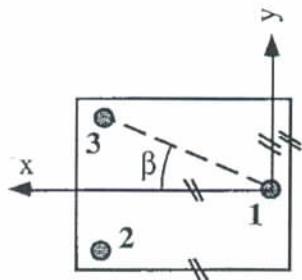


Fig. 4.6 : Koordinatensystem am Boden des Gravimeters D-86

So ergeben sich folgende Koordinaten im oben definierten System (Genauigkeit ± 0.2 mm)

| | x [mm] Boden | y [mm] | | x [mm] Decke | y [mm] |
|--------|-----------------|--------|--|-----------------|--------|
| 1 | 0.0 | -0.0 | | 1.1 | -1.8 |
| 2 | 154.8 | -66.6 | | 160.0 | -67.6 |
| 3 | 155.4 | 66.2 | | 155.0 | -63.7 |
| Okular | | | | 53.3 | 25.6 |
| β | 25.64 gon | | | | |

Tab 4.1 : Koordinaten des Gravimeters D-86 im lokalen Koordinatensystem

Obwohl jedes Instrument individuell gebaut wird, sind die Unterschiede zwischen den Geräten doch so klein, dass der Angriffspunkt der Schwere bezüglich der Lage der Fussschrauben innerhalb 1 cm gleich bleibt.

Im Kapitel 5.2 wird beschrieben, wie die Lage des Gravimeters gegenüber dem Stausee bestimmt wurde.

5. Der Störkörper

Die Form und Dichte des Störkörpers sind neben der Position der Messpunkte gegenüber dem Körper der wichtigste Faktor zur Berechnung der Modellwirkungen der Schwere. Ideal für die Bestimmung von G ist ein möglichst grosser Störkörper, der in Form und Dichte gut bekannt ist.

5.1 Der Gigerwaldsee

Der Staumauer Gigerwald wurde 1976 im Calfeisental westlich von Vättis (SG) von der Kraftwerke Sarganserland AG errichtet. Das Tal ist eng, so dass der Stausee recht abschüssige Uferpartien besitzt. Der langgezogene See weist ein Länge von ca. drei Kilometern auf und endet beim Dorf St. Martin. Dieses lag ursprünglich im heutigen Seengebiet, wurde aber im Rahmen des Baus der Staumauer verschoben.

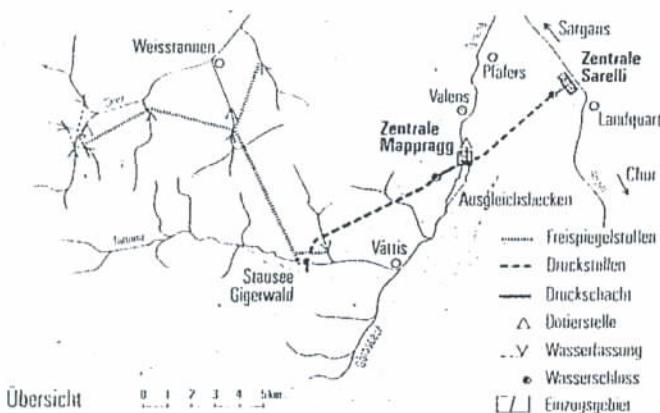


Fig. 5.1 a : Übersicht des Gebiets des Gigerwaldsees

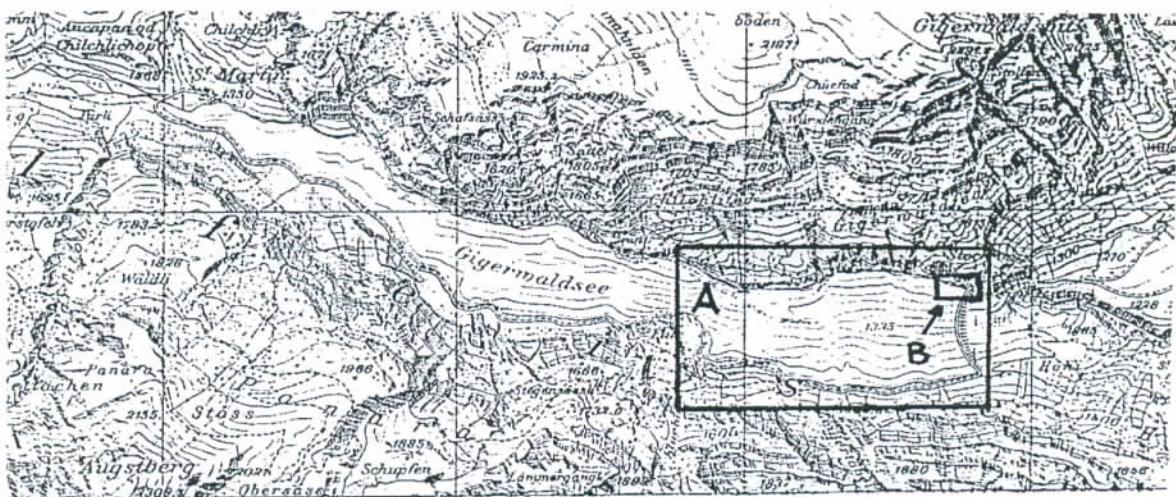


Fig. 5.1 b : Gigerwaldsee im Massstab 1:25'000, mit Ausschnitten A (sh. Fig 5.2) und B (sh. Fig.8.1).
Reproduziert mit Bewilligung des Bundesamtes für Landestopographie vom 4.1.95.

Der Pegelstand des Sees ist im Frühling am tiefsten. Er wird während den Sommermonaten hauptsächlich mit Schmelzwasser gefüllt und erreicht seinen maximalen Stand ungefähr im September. Die theoretisch minimale Staukote beträgt 1240 m, die maximale 1335 m, wobei beide Werte nie ganz erreicht werden. Die Anlage des Kraftwerks besteht aber nicht nur aus diesem Stausee. Unterhalb von Vättis befinden sich ein Auffangbecken und die Hauptzentrale Mapragg. Außerdem existieren auch ein Pumpwerk und ein Stollen, der das Auffangbecken mit dem Gigerwaldsee verbindet. So ist man in der Lage, während Billigstromzeiten 33 m^3 Wasser pro Sekunde wieder in den Stausee zurückzupumpen, um sie in Spitzenzeiten des Stromverbrauchs wieder zu benutzen. Von der Hauptzentrale führt weiter ein Druckstollen in das Rheintal hinunter, wo das Wasser nochmals zur Stromerzeugung verwendet wird.

Der Störkörper für die Bestimmung von G ist die Wassermasse zwischen zwei verschiedenen Pegelständen am Stausee. Ideale Messpunkte zur Bestimmung des Schwereeffekts des Körpers sind Punkte, an welchen sich maximale Schwereänderungen ergeben. Als bestmögliche messbare Station ergeben sich Punkte in der Mitte der Staumauer, einmal in der Nähe der Obergrenze des Wasserspiegels, und einmal in der Nähe der Untergrenze. In der ganzen Staumauer hat es diverse Kontrollstollen und -schächte sowie einzelne Räume. In zwei von diesen Räumen, je in der (horizontalen) Mitte der Mauer wurde je eine Messstation eingerichtet, eine im obersten (Station 1331) und einer im untersten Stollen (Station 1242) der Staumauer. Mit dieser Wahl der Messstationen können bei maximalen Wasserstandsänderungen die grössten Schweredifferenzen gemessen werden.

Die Dichte des Störkörpers ist in erster Näherung diejenige des Stauwassers. Diese wurde vom Physikinstitut der UNI Zürich im Rahmen ihres Versuchs am Gigerwaldsee in Labor bestimmt und war $1.2 \cdot 10^{-4} \text{ g cm}^{-3}$ tiefer als diejenige von reinem Wasser. Ebenfalls von der UNI Zürich wurde ein Temperaturprofil durchgeführt. Es zeigte keine signifikanten Änderungen mit der Tiefe mit Ausnahme einer dünnen Schicht an der Oberfläche. Weiter schwankte die Temperatur während den Messperioden von 3°C bis 6°C . Innerhalb dieses Bereichs sind Dichteänderungen vernachlässigbar ($\rho(3^\circ\text{C}) = 0.999964 \text{ g cm}^{-3}$, $\rho(4^\circ\text{C}) = 0.999972 \text{ g cm}^{-3}$, $\rho(5^\circ\text{C}) = 0.999964 \text{ g cm}^{-3}$). Die Dichte des Wassers kann jedoch nicht direkt als die Dichte des Störkörpers eingeführt werden. An den Stellen, die neu Wasser enthalten, befand sich vorher Luft, die eine Dichte von rund 0.0011 g cm^{-3} aufwies (Dichte von Luft bei Normdruck und $0^\circ\text{C} \approx 0.0012 \text{ g cm}^{-3}$, durchschnittlicher Druck auf 1300 m ü. Meer $\approx 900 \text{ mbar}$). Damit ergibt sich eine effektive Dichte des Störkörpers von $0.9988 \pm 0.0001 \text{ g cm}^{-3}$.

5.1.1 Die Seeform

Für die Volumenbestimmung des Sees wurde von der Kraftwerke Sarganserland AG ein Plan 1:2000 und zwei Meter Äquidistanz der Höhenkurven im Ladeskoordinatensystem erstellt. Daraus wurden die Höhenlinien im Rahmen des VTB 1990 digitalisiert, allerdings nur bis zu einer Entfernung von rund einem Kilometer von der Staumauer.

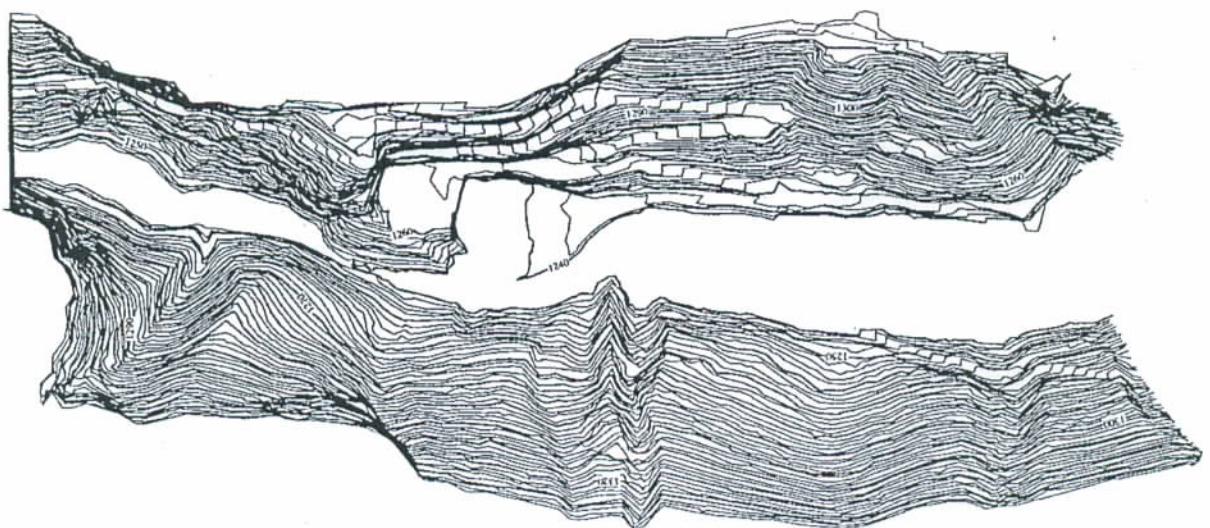


Fig. 5.2 Digitalisierter Teil der Höhenkurven des Gigerwaldsees (Massstab 1:6250, Äquidistanz 2 m, Ausschnitt A von Fig. 5.1 b)

Die Geometrie des Staudamms ist durch stückweise definierte Parabeln gegeben (sh. Anhang A). Für die Schwerkraftwirkung des Störkörpers ist nur die Bergseite massgebend. Die Form der Staumauer ist in einem lokalen Koordinatensystem bestimmt und ist stückweise mit Parabeln zweiter resp. dritter Ordnung definiert. Für den Bau der Staumauer wurden spezielle, verbiegbare metallische Schalungselemente verwendet. Dadurch konnte die Genauigkeit des Bauwerks innerhalb 1 cm der Definitionen gehalten werden.

5.2 Messstationen

Zur Überwachung der Bewegung der Staumauer führt durch jeden Stollen der Staumauer ein Präzisions-polygonzug mit fixen Messpfeilern (sh. Anhang B). Regelmässige Messungen werden auf diesen Stationen von der Firma Schneider AG in Chur durchgeführt. Von je einem dieser Pfeiler konnten die Gravimeterstationen eingemessen werden.

Für die Bestimmung von G ist es notwendig, dass die gravimetrischen Messungen immer genau am gleichen Ort durchgeführt werden. Sonst ist es falsch anzunehmen, dass die Schwereänderung nur auf den in Dichte und Form bekannten Störkörper zurückzuführen ist. Damit wäre der ganze Vorteil gegenüber Bohrloch- und Turmexperimenten wieder verloren.

Die Aufstellung muss also so gewählt werden, dass sie möglichst konstant ist. Um das zu erreichen, wird das Gravimeter auf speziellen Zylinderbolzen aufgestellt. Diese Bolzen wiederum befinden sich in Dübeln am Boden der Kontrollgänge. Die Bolzen wurden seit Anfang der ersten Messungen in Gigerwald im Betonboden der Staumauer gelassen, wo sie niemanden stören. Pro Station gibt es drei Bolzen, je einer für eine Fußschraube, mit leicht verschiedenen Formen. Im Bolzen für die Fußschraube 1 befindet sich ein Loch, in das die Fußschraube gestellt wird. Für die Fußschraube 3 ist ein Bolzen mit einem Schlitz

vorhanden. Von den Messpfeilern wurde dann das Loch des ersten Bolzens und die Enden des Schlitzes des zweiten Bolzens eingemessen. So ist die Lage der Fussschraube 3 bestimmt als der Schnittpunkt eines Kreises mit Radius 168.6 mm (nach Tab. 4.1) um das Loch des ersten Bolzens und der Gerade des Schlitzes des zweiten Bolzens.

Damit und mit der bei jeder Schweremessung bestimmten Höhe des Instruments, ist die Lage des Gravimeters bestimmt, so dass der dritte Bolzen einfach flach ist und nur zur Stabilisierung dient.

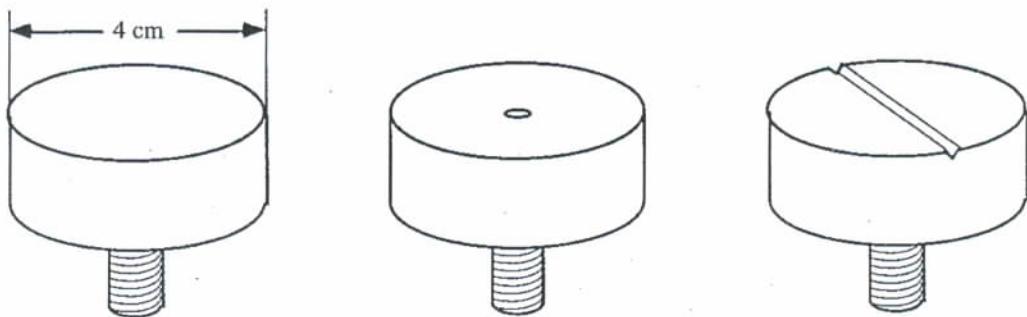


Fig. 5.3 Die drei verschiedenen Bolzen für die Fussschrauben der Gravimeter

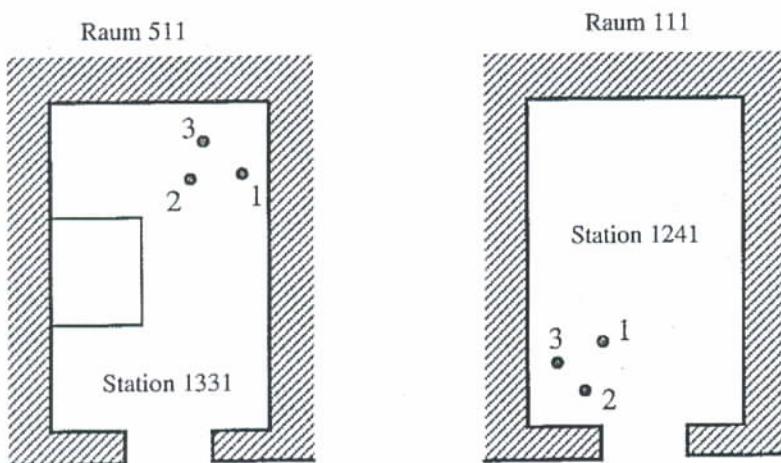


Fig. 5.4 : Punktskizzen der gravimetrischen Messstationen in der Staumauer Gigerwald

Die Koordinaten der Stationen können im Anhang E nachgeschaut werden.

5.3 Annäherung der Seeform mit Polyedern

Um den Schwereeffekt von einem Störkörper berechnen zu können, muss dieser zunächst einmal definiert werden. Von der Form des Wassers kennen wir die Höhe der Ober- resp. Unterfläche. Weiter kennen wir die Höhenkurven alle zwei Meter. Während den ersten zwei Vertiefungsblöcken wurde der Seekörper einfach mit zwei Meter dicken senkrechten Prismen angenähert, deren Grundriss den entsprechenden

Höhenlinien entsprach. Das oberste resp. unterste Prisma wurde entsprechend den Wasserständen dünner gewählt. Der Effekt konnte dann nach Van Baak (1990) berechnet werden.

Eleganter ist es, den gesamten Störkörper mit einem Polyeder anzunähern. Dies bietet die Möglichkeit, auch nicht senkrechte Ebenen im Modellkörper auftreten zu lassen. Insbesondere in der Nähe der Staumauer ist dies von Vorteil.

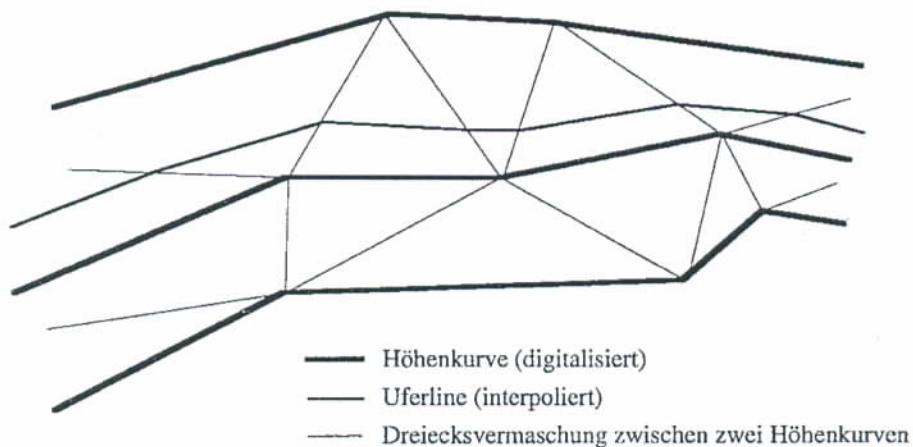


Fig 5.5 Interpolation zwischen den Höhenlinien mit Dreiecken

Um ein Polyeder zu generieren, kann die Form des Sees zwischen zwei Höhenkurven mit Dreiecksflächen interpoliert werden. (sh. Fig. 5.5). Die Ober- und Unterfläche des Störkörpers werden dann mit den Dreiecken des Ufers geschnitten, wodurch ein ebenflächiges Polyeder bestimmt ist.

5.4 Berechnung des Schwereeffekts eines Polyeders allgemeiner Form

Mathematisch kann der Schwereeffekt eines Körpers wie folgt berechnet werden :

$$T_z = G \int \int \int \rho \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} dz \quad [5.1]$$

Allgemein kann dieses Integral nur numerisch gelöst werden. Für uns kommt als Vereinfachung dazu, dass die Dichte des Störkörpers konstant ist. Der Schwereeffekt eines Polyeders allgemeiner Form konstanter Dichte kann nach Arnet [1992] ohne numerische Integration berechnet werden :

$$\frac{T_z}{G\rho} = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{m_i} \left(y_0 + \frac{z_0(c - ba)}{1 + b^2 + c^2} \right) P - z_0 R \quad [5.2]$$

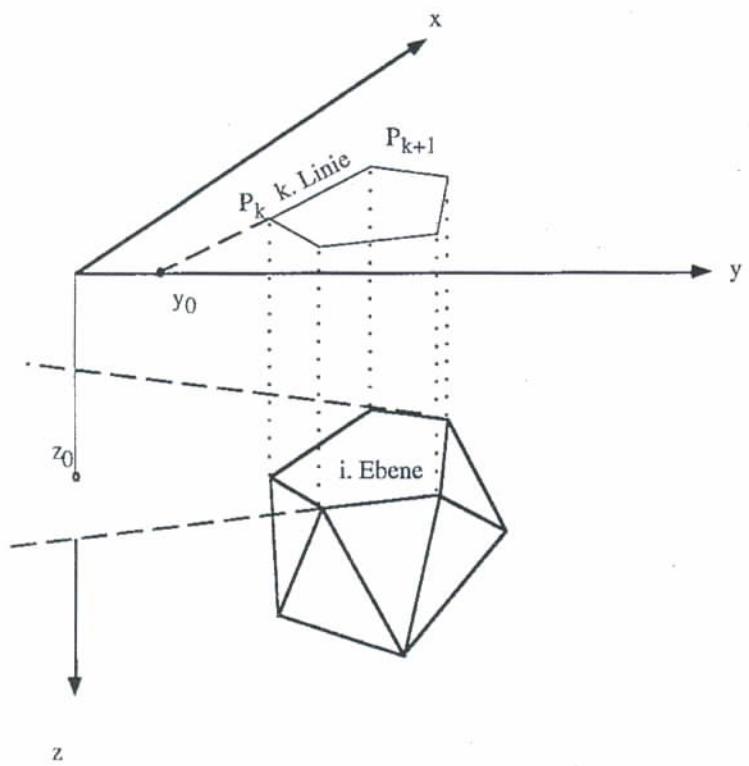


Fig 5.6 : Polyeder

| | | |
|-----|-----------------------|---|
| mit | n | : Anzahl Flächen des Polyeders |
| | m_i | : Anzahl Seiten der i . Fläche |
| | $z = z_0 + b x + c y$ | : Ebenengleichung der jeweilig aufsummierten Ebene |
| | $y = y_0 + a x$ | : Geradengleichung der jeweiligen Gerade, projiziert auf (x,y) -Ebene |

$$P = \frac{1}{\sqrt{1+a^2+(b+ca)^2}} \ln \frac{\frac{x_{k+1}+ay_{k+1}+(b+ca)z_{k+1}}{\sqrt{1+a^2+(b+ca)^2}} + \sqrt{x_{k+1}^2+y_{k+1}^2+z_{k+1}^2}}{\frac{x_k+ay_k+(b+ca)z_k}{\sqrt{1+a^2+(b+ca)^2}} + \sqrt{x_k^2+y_k^2+z_k^2}}$$

$$R = \frac{1}{1+b^2+c^2} \left(\arctan \frac{((b^2+c^2+1)y_0+(c-ba)z_0)x_{k+1}+(by_0-az_0)z_0}{z_0 \sqrt{x_{k+1}^2+y_{k+1}^2+z_{k+1}^2}} \right)$$

$$- \arctan \frac{((b^2+c^2+1)y_0+(c-ba)z_0)x_k+(by_0-az_0)z_0}{z_0 \sqrt{x_k^2+y_k^2+z_k^2}} \right)$$

6. Messungen am Stausee

Die ersten gravimetrischen Messungen wurden im VTB 1989 durchgeführt. Zu diesem Zeitpunkt wurden auch die Schwerestationen eingerichtet. Zusätzlich wurde in diesem VTB auch noch auf einer Referenzstation gemessen, die rund einen halben Kilometer von der Staumauer weg auf einem Fels eingerichtet wurde. Die Messungen wurden mit den zwei LaCoste-Romberg Gravimetern D-16 und D-86 durchgeführt. Die Messreihenfolge, die auch in späteren Jahren verwendet wurde, war so, dass zuerst auf der Station 1331 gemessen wurde, danach 1241, und nochmals 1331. Die Wasserstände schwankten von minimal 1262 m bis maximal 1309 m.

Während eines Messtages wurde das Instrument D-16 an ein Registriergerät angeschlossen, um die Gezeiten zu überprüfen. Weiter wurden 1989 die Stationen geodätisch eingemessen.

Ein zweiter VTB wurde 1990 durchgeführt. Neben den beiden D-Gravimetern wurde hier auch erstmals das mit Feedback ausgerüstete Gravimeter G-839 eingesetzt. Der Wasserstand schwankte in diesem Jahr kaum und betrug immer ungefähr 1320 m. Beim diesjährigen VTB mit dem Thema der Bestimmung von G wurden die Gravimeter G-839 und G-514 auf Wasserständen von 1290 m und 1298 m verwendet.

Grundsätzlich kann über die Messungen gesagt werden, dass relativ viele Probleme aufgetreten sind (Schläge, Batterieprobleme) und dass die Messgenauigkeit jeweils bei ungefähr 15 bis 20 μgal lag (sh. Anhang D).

Die Auswertung der Gravimetermessungen erfolgte mit dem Programm adjust von F.Arnet [1993]. An allen Messtagen schwankte der Wasserstand, zum Teil bis zu einem Meter. Dies entspricht einer Änderung der Schweredifferenz zwischen den 2 Stationen von über 20 μgal . Da alle Messtage relativ kurz waren (weniger als 6 Stunden) wurde angenommen, dass keine Instrumentendrift vorhanden war. Die Drift sollte während dieser Zeit kleiner als 7 μgal sein. Eine rechnerische Bestimmung der Drift wäre zu stark von den Messfehlern beeinflusst und kaum ein guter Schätzwert für die tatsächliche Drift. Um annehmen zu können, dass die Schwere an einem Tag an einer Station konstant war, mussten wegen den Wasserspiegelschwankungen die Messungen um einen theoretischen Wert korrigiert werden. Würde das Modell genau stimmen, so müsste mit dieser Reduktion die Schweredifferenz zwischen den zwei Stationen während den Jahren konstant bleiben. Um das Newton'sche Gravitationsmodell zu überprüfen, darf diese Annahme allerdings nicht gemacht werden. Viel mehr müssen nachträglich die erhaltene Schweredifferenz eines Tages wieder zurückkorrigiert werden. Die Resultate der Schweremesstage sind in der Tabelle 6.1 zusammengefasst. Die Messungen können im Anhang D nachgeschaut werden.

| Tag | $g_{1241} - g_{1331}$ [mgal] | $\sigma_{\Delta g}$ [μgal] | mittl. Wasserstand [m] |
|---------------|---------------------------------|--|---------------------------|
| 27.April 1989 | 13.256 | 12.1 | 1262.06 |
| 11. Mai 1989 | 13.813 | 6.9 | 1283.96 |

| | | | |
|--------------|--------|------|---------|
| 25. Mai 1989 | 14.543 | 6.8 | 1308.93 |
| 7. Juni 1989 | 14.496 | 9.9 | 1306.77 |
| 23. Mai 1990 | 14.856 | 4.9 | 1321.16 |
| 7. Juni 1990 | 14.867 | 6.1 | 1321.35 |
| 6. Mai 1994 | 14.020 | 8.7 | 1291.97 |
| 2. Juni 1994 | 14.234 | 11.3 | 1298.48 |

Tab 6.1 : Gravimetrische Messresultate

7. Resultate

7.1 Gewichtung der Messergebnisse

Um abzuschätzen, wie die einzelnen Messtage für die Berechnung von G zu gewichten sind, soll ein einfaches Modell gewählt werden. Dieses kann als ein Halbzylinder für den See angenommen werden, mit der Lage der Stationen auf der Zylinderachse, am oberen resp. unteren Ende des Zylinders. Dann ergibt sich mit dem Newtonschen Gravitationsgesetz :

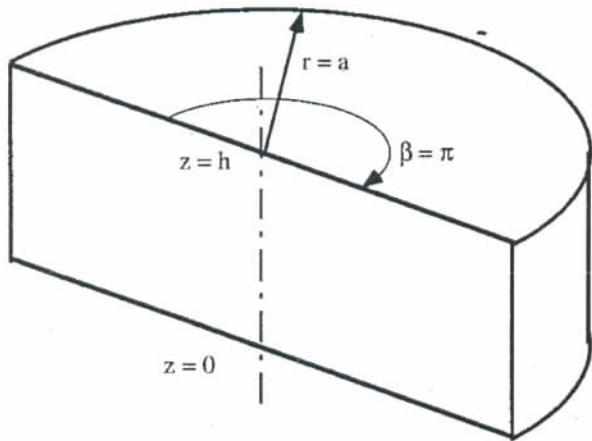


Fig 7.1 : Halbzylinder zur Annäherung des Störkörpers

$$\Delta g = G \rho \int_{r=0}^a \int_{\beta=0}^{\pi} \int_{z=0}^h \frac{r z}{\sqrt{r^2 + z^2}} dr d\beta dz = G \rho \frac{\pi}{2} \left(h - \left(\sqrt{a^2 + h^2} - a \right) \right) = G \rho \frac{\pi}{2} T \quad [7.1]$$

$$h + a = \sqrt{a^2 + h^2}$$

$$\Delta g = G \rho \frac{\pi}{2} T$$

$$\xi = \frac{M G}{r^2} = \frac{h}{r^2} = \frac{h}{a^2 + h^2}$$

Als Annäherungen sollen folgende Werte genommen werden :

$$G = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2} \quad \rho = 1000 \text{ kg m}^{-3} \quad a = 200 \text{ m} \quad h = 60 \text{ m}$$

Für eine Fehlerabschätzung muss zunächst das totale Differential berechnet werden :

$$d\Delta g = \rho \pi T dG + G \pi T d\rho + G \rho T d\beta + G \rho \pi \left(1 - \frac{h}{\sqrt{a^2 + h^2}} \right) dh + G \rho \pi \left(1 - \frac{a}{\sqrt{a^2 + h^2}} \right) da \quad [7.2]$$

Unser Ziel ist es die Gravitationskonstante G zu bestimmen. Somit ergibt sich für den mittleren Fehler m_G

$$\sigma_G^2 = \left(\frac{G}{\rho} \right)^2 \sigma_\rho^2 + \left(\frac{G}{\pi} \right)^2 \sigma_\pi^2 + \left(\frac{1}{\rho \pi T} \right)^2 \sigma_{\Delta g}^2 +$$

$$\left(\frac{1}{\rho^2 T} \right)^2 \sigma_\beta^2 = \frac{1}{10^3 \cdot 10^3 \cdot \pi} \cdot \dots$$

$$\left(\frac{G}{T} \left(1 - \frac{h}{\sqrt{a^2 + h^2}} \right) \right)^2 \sigma_h^2 + \left(\frac{G}{T} \left(1 - \frac{a}{\sqrt{a^2 + h^2}} \right) \right)^2 \sigma_a^2 \quad [7.3]$$

Mit $\Delta g = (g_{1331,h_1} - g_{1242,h_1}) - (g_{1331,h_0} - g_{1242,h_0})$ wird $\sigma_{\Delta g}^2 = 4 \sigma_g^2$

Als ungefähre Genauigkeiten sollen folgende Werte angenommen werden :

$$\sigma_p \approx 0.1 \text{ kgm}^{-3} \quad \sigma_\beta = 0 \quad \sigma_g \approx 10 \text{ µgal} \quad \sigma_h \approx 0.05 \text{ m} \quad \sigma_a \approx 0.5 \text{ m}$$

$$\text{Damit wird } \sigma_G^2 \approx (4.4 \cdot 10^{-29} + 0 + 1.8 \cdot 10^{-25} + 2.2 \cdot 10^{-27} + 7.5 \cdot 10^{-28}) (\text{m}^2 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-2})^2 \text{ und} \\ \sigma_G \approx \pm 0.043 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-2} \approx 7 \cdot 10^{-3} \text{ G} \quad [7.4]$$

Daraus wird klar, dass σ_g den grössten Einfluss auf σ_G hat

$$\sigma_G^2 \approx \left(\frac{2}{\rho \pi (h - (\sqrt{a^2 + h^2} - a))} \right)^2 \sigma_g^2 = \left(\frac{1}{\rho \pi h} \right)^2 \sigma_{\Delta g}^2$$

Ein Resultat für G erhält somit ein Gewicht, das proportional zur Dicke des Störkörpers ist. Weiter ist das Gewicht noch abhängig von $\sigma_{\Delta g}$

7.2 Resultate

| Tag | $\Delta g - \Delta g_{27.4.89}$ [mgal] | $\sigma_{\Delta g}$ [µgal] | G $[10^{-11} \text{ m}^3 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-2}]$ | h [m] | σ_G $[10^{-11} \text{ m}^3 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-2}]$ |
|--------------|---|-------------------------------|--|----------|---|
| 11. Mai 1989 | 0.557 | 13.9 | 6.622 | 22. | 0.20 |
| 25. Mai 1989 | 1.287 | 13.9 | 6.587 | 47. | 0.09 |
| 7. Juni 1989 | 1.240 | 15.6 | 6.498 | 45. | 0.11 |
| 23. Mai 1990 | 1.600 | 13.1 | 6.745 | 59. | 0.07 |
| 7. Juni 1990 | 1.611 | 13.6 | 6.720 | 59. | 0.07 |
| 6. Mai 1994 | 0.764 | 14.9 | 6.792 | 30. | 0.16 |
| 2. Juni 1994 | 0.978 | 16.6 | 6.581 | 36. | 0.15 |

Tab 7.1: G-Werte der einzelnen Messtage gegenüber dem 27.April 1989

Das gewichtete Mittel für G ergibt

$$\overline{G} = (6.670 \pm 0.038) \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-2} \quad \frac{\sigma_{\overline{G}}}{\sigma_G} = \sqrt{\frac{v^T P v}{n - 1}} = 1.00$$

$0.038 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-2}$ entspricht dabei dem mittleren Fehler a priori als auch a posteriori. Der erhaltene Wert für G liegt damit klar im Bereich des im Labor bestimmten Wertes (sh. [2.1]). Es gibt ebenfalls keine signifikanten Korrelationen von G mit der Wasserhöhe.

8. Fehlerabschätzung

Bei der Abschätzung der Gewichtung der einzelnen Messtage in 7.1 wurden folgende Fehler berücksichtigt:

- Ablesegenauigkeit der Gravimeter
- Messgenauigkeit der Pegelstandsmessung
- Ungenauigkeit der Digitalisierung des natürlichen Ufers
- Dichte des Störkörpers

Es hat sich gezeigt, dass ausser der Ablesegenauigkeit der Gravimeter die obigen Fehler vernachlässigt werden können. Weitere Fehlerquellen, denen in dieser Untersuchung keine Beachtung geschenkt wurden, sind :

- systematische Fehler der Gravimeter
- Änderung der Richtung der Schwere infolge Ablenkung durch die Störkörper
- systematischer Fehler der Pegelstandsmessung
- Porosität des Gesteines (Sickerwasser)
- Geometrie der Gebäude bei der Mauer
- Nicht digitalisierter Teil des Sees
- Annäherung der Mauerform durch Polyeder
- Ungenauigkeit der Staumauer
- Genauigkeit der Koordinaten Messstationen
- Deformation der Staumauer infolge Wasserstandsänderungen
- Erdkrümmung

Diese Fehlereinflüsse werden im folgenden der Reihe nach behandelt.

Der grösste systematische Fehler bei Gravimetern ist ein falscher Korrekturfaktor. Durch Kalibrationen der Instrumente auf absoluten Schwerelinien hat sich gezeigt, dass der offizielle, von LaCoste-Romberg gegebene Faktor bis zu $\pm 5 \cdot 10^{-4}$ falsch sein kann. Dieser Fehler wird direkt auf G übertragen und ist im Vergleich mit [7.4] vernachlässigbar.

Die Ablenkung des Lots infolge des Störkörpers wurde mit Hilfe von Formeln aus Arnet [1992] berechnet (sh Anhang C). Als maximale Abweichung ergibt sich dabei zwischen leerem (1240 m) und vollem See (1337 m) 0.7 cc. Dies ist viel kleiner als die Horizontierungsgenauigkeit des Instruments und kann vernachlässigt werden.

Laut Herrn Keller vom Büro Schneider in Chur gibt es einen Offset von ≈ 12 cm zwischen der Anzeige der Rittmeyerwaage in der Staumauer und der tatsächlichen Seehöhe. Eine Messung während des VTB 1989 ergab auch diese Differenz. Ein von der UNI Zürich im Rahmen ihres Projekts zur Bestimmung von G installiertes Gerät zur Pegelstandsmessung, weist ebenfalls diesen Unterschied aus. Der Effekt eines solche

systematischen Fehler kann aus der Tab. 8.1 abgeschätzt werden und ist vernachlässigbar. Da es aber einfach ist, ihn zu korrigieren, wird er trotzdem berücksichtigt.

Die Porosität des Gesteins in der Umgebung könnte das gesamte Experiment gefährden, wenn grosse Massenänderung durch Sickerwasser vorhanden wären. Geologische Untersuchungen vor dem Staueseubau ergaben jedoch keine Hinweise in diese Richtung.

Mit änderndem Wasserstand ergeben sich horizontale Deformationen bis zu 30 mm und horizontale bis zu 6 mm in der Mauer (sh. Anhang B). Dabei bleibt Mauerdicke allerdings konstant, so dass sich die relative Lage der Messstationen zum Störkörper wenig beeinflusst wird. Eine Abschätzung der Änderung der Schwere infolge Verschiebung im Schwerfeld ohne Störkörper ist $< 2 \mu\text{gal}/\text{m}$ und ist gegenüber dem Messfehler der Gravimeter vernachlässigbar.

Um den Einfluss von nicht oder ungenau digitalisierten Gebäuden nahe dem nördlichen Ende der Staumauer abzuschätzen, wurde der Einfluss eines Körpers "maximalen Fehlers" an den Stationen berechnet. Dieser ist $6 \cdot 10^2 \mu\text{gal}$ auf der Station 1331 und $-30 \cdot 10^2 \mu\text{gal}$ auf der Station 1241, also auf beiden Stationen vernachlässigbar.

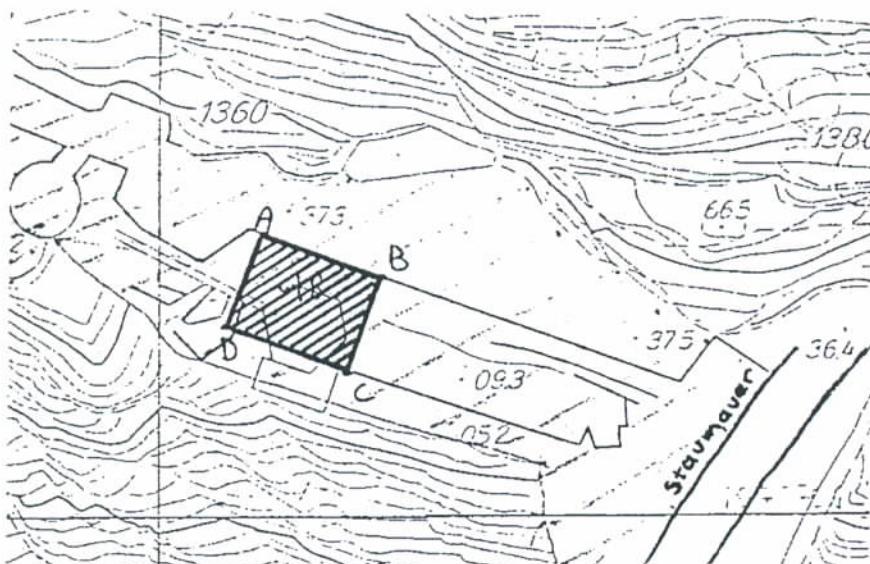


Fig. 8.1 Störkörper am Rande der Staumauer (Massstab 1 : 1000, Ausschnitt B aus Fig. 5.1 b)

Ebenfalls eine Abschätzung wurde für den hinteren Teil des Stauses berechnet. Der Schwereeffekt des nicht berücksichtigten Wassers beträgt bei einer Wasserstandsänderung von 1240 auf 1338 m ungefähr $6.3 \mu\text{gal}$ auf der Station 1241 und $-1.9 \mu\text{gal}$ auf 1331. Diese Werte sind relativ gross, und die digitalisierten Höhenkurven sollten deswegen im hinteren Bereich um einige Punkte ergänzt werden, so dass der Fehler vernachlässigbar wird.

Bei der Annäherung der Form der Staumauer mit einem Polyeder stellt sich die Frage, wie viele Stützpunkte an der Staumauer gewählt werden müssen, um deren Form genügend genau zu erhalten. Wird auf einer konstanten Höhe alle 3 m ein Punkt gewählt, so ergibt sich bei einem minimalen Kurvenradius der Staumauer von 100 m eine Pfeilhöhe von 0.01 m, was der Baugenaugkeit entspricht und somit ausreichend ist.

Der Störeffekt infolge des Fehlers der Koordinaten der Messstationen ist vergleichbar mit demjenigen der Bauungenauigkeit. Dazu wurden numerisch die Schweregradienten ausgerechnet und es ergibt sich im lokalen Koordinatensystem der Staumauer :

| | dg/dx [$\mu\text{gal}/\text{m}$] | dg/dy [$\mu\text{gal}/\text{m}$] | dg/dz [$\mu\text{gal}/\text{m}$] |
|------|---|---|---|
| 1241 | -1 | 25 | 5 |
| 1331 | 1 | 22 | 29 |

Tab 8.1 : Einflüsse infolge Ungenauigkeit der Stationskoordinaten.

Bei einem mittleren Fehler der Stationskoordinaten gegenüber den effektiven Staumauerkoordinaten von < 2 cm ergeben sich im Vergleich zur Messgenauigkeit der Gravimeter vernachlässigbare Abweichungen von weniger als 1 μgal .

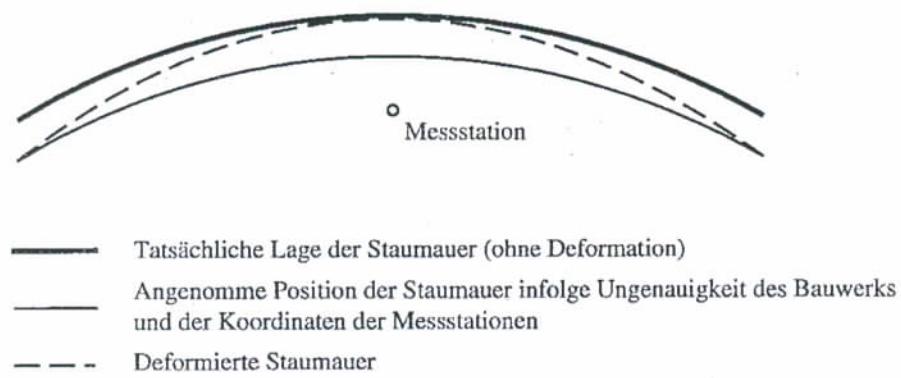


Fig 8.2 Störeffekte infolge Deformation und Bauungenauigkeit. Die Deformationen sind am Rand am grössten, weil die sich die Lagen der Messstationen infolge der Verformung ebenfalls verschieben.

Der Fehler infolge der Deformation der Staumauer um einen bestimmten Betrag ist wesentlich kleiner als ein gleich grosser Fehler in der Position, wie aus Fig. 8.2 ersichtlich ist. Bei Deformation von < 4 cm ist das also auch vernachlässigbar.

Die Erdkrümmung beträgt in einem Kilometer Entfernung = 7 cm, in 3 km = 65 cm und verursacht ähnliche Störungen wie ein Höhenfehler. Mit der Tab 8.1 und der relativ grossen Entfernung, wo die Erdkrümmung spürbar zunimmt, kann abgeschätzt werden, dass auch dieser Effekt vernachlässigt werden kann.

9. Schlussbemerkungen

Es hat sich hier gezeigt, dass auch mit relativ einfachen Mitteln und geringer Messerfahrung eine erstaunlich hohe Genauigkeit für G erreicht werden kann. Dies wurde natürlich erst möglich dank Mithilfe von verschiedenen anderen Leuten und Institutionen, denen hier gedankt werden soll.

- Der Kraftwerke Sarganserland AG, dank der wir erst Zutritt zum Stausee Gigerwald hatten und die uns vor allem in der Anfangsphase des Projekts tatkräftig unterstützten.
- Dem Ingenieurbüro Schneider in Chur zum Verfügungstellen der Pfeilerkoordinaten und spezieller Messmarken und Adapter
- Allen Studenten und Assistenten, die in den Vertiefungsblöcken irgendwie beteiligt waren : Prof. Dr. Emile Klingelé, dem Vater der Idee und Leiter der Blöcke, den Assistenten Dr. Alain Geiger und Dipl. Ing. Felix Ettlin, den Studenten Isabel Cutka und Felix Arnet (VTB 1989), Ralph Glaus und Christian Straub (VTB 1990) sowie Reynald Thierrin (VTB 1994).
- Dr. A.Cornaz, Dr. B.Hubler und Prof. Dr.W.Kündig von der Universität Zürich für ihre Zusammenarbeit

Ideen für weitere Arbeiten am Gigerwaldsee zur Bestimmung von G bestehen. Ein nächster Schritt wäre sicher die Installation zweier Feedback-Gravimeter über mehrere Wochen oder gar Monate auf den Stationen, wodurch die Messgenauigkeit und die Datenmenge beträchtlich gesteigert werden könnte. Direkt davon betroffen wäre dann natürlich auch die Genauigkeit der Bestimmung von G ...

Literaturverzeichnis

- Arnet, F. : **POTENZ, ein Progampaket zur exakten Berechnung der Gravitationsfeldgrößen Potential, Beschleunigung und Schweretensor von beliebigen Polyedern**, *IGP Bericht 192*, 1992
- Arnet, F. : **Crustal Deformation Studies in the Yellowstone National Park, Part I: Levelling and Gravity Data**, *IGP Bericht 220*, 1993
- Barnett, C.T. : **Theoretical modeling of the magnetic and gravitational fields of an arbitrarily shaped three-dimensional body**. *Geophysics 41*, 1353-1364, 1976
- Belgolov, V.T. : **Calculation of magnetic and gravitational fields in the approximation of bodies by polygons and polyhedrons. Geophysical methods of exploration and surveying for deposits of ore resources in Siberia**, *Tr. SNIIGGIMS 136*, Novosibirsk, 1971
- Comité Nationale Suisse des Grands Barrages : **Barrages Suisse : Surveillance et entretien**, 1985
- Cornaz, A., Huber B. and W.Kündig : **Determination of the Gravitational Constant at an Effective Interaction Distance of 112 m**, *Preprint PRL*, 1993
- Cutka, I. und F.Arnet : **Bestimmung der Gravitationskonstante**, *VTB 1989*
- Glaus, R. , Straub, C. : **Bestimmung der Gravitationskonstante**, *VTB 1990*
- Golizdra, G.Y. : **Calculation of gravitational field of a polyhedron**. *Izvestia Earth Physics 17*, 625-628.,1981
- Gutdeutsch, R. : **Anwendungen der Potentialtheorie auf geophysikalische Felder**. Springer, Heidelberg, New York, 1986
- Jung, K. : **Schwerkraftverfahren in der angewandten Geophysik**. Akad. Verlagsgesellschaft Geest und Portig, 348 ff., 1961
- Kellogg, O.D. : **Foundations of Potential Theory**. Julius Springer, pp. 384 Berlin, 1929
- Kraftwerke Sarganserland AG : **Definitionen, lokales Koordinatensystem und geometrische Form der Staumauer**, 1978
- Kwok, Y.K. : **Gravity Gradient Tensors Due to a Polyhedron with Polygonal Facets**. *Geophysical Prospecting 39*, 435-443.1991
- Longman, I. : **Formulas for Computing the Tidal Accelerations due to the Moon and the Sun**, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 64 No 12., 1959
- Mader, K. : **Das Newton'sche Raumpotential prismatischer Körper und seine Ableitungen bis zur dritten Ordnung**, *Sonderheft 11 der Österreichischen Zeitschrift für Vermessungswesen*, Wien., 1951
- Okabe, M. : **Analytical expressions for gravity anomalies due to homogeneous polyhedral bodies and translations into magnetic anomalies**. *Geophysics 44*, 730-741. 1979
- Palmonari, F. : **A measurement of the gravitaional constant G in the 10 - 100 m Range of distances**, 1989
- Paul, M.K. : **The gravity effect of a homogeneous polyhedron for three-dimensional interpretation**. *Pure and Applied Geophysics 112*, 553-561. 1974
- Sager, W. et al. : **Non-Newtonian Gravity or Gravity Anomalies ?**, *EOS*, 1988
- Sands, R. et al. : **A Detection of Non-Newtonian Gravity**, *Journal of Geophysical Research*, Vol 94, 1989

Service Hydrographique de la Marine: Tidal Gravity Corrections

Stacey, F.D et al. : **Non-Newtonian Gravity : Geophysical evidence. Precision Measurements and Fundamental Constants II, Spec. Publ. 617, pp. 597-600**, National Bureau of Standards, Gaithersburg, Md., 1984.

Strakhov, V.N. : Use of the methods of the theory of functions of a complex variable in the solution of three-dimensional direct problems of gravimetry and magnetometry. *Doklady Akademii Nauk SSSR 243, 70-73*. 1978

Stucky Ingenieurs Conseils SA : Barrage de Gigerwald : Definition générales II, 1974

Stucky Ingenieurs Conseils SA : Barrage de Gigerwald, 1973

Thierrin, R. : **Détermination des constante G, VTB 1994**

Talwani, M. : **Computer Usage in the Computation of Gravity Anomalies**. In Bolt, B.A. : *Methods of Computational Physics, Band 13, p. 343-389*. Academic Press, New York, London. 1973

Tsuboi Chuji : **Gravity**, George Allen & Unwin, 1983

Van Baak, D. **Efficient computation of the gravitational field of a generalized cylindric prism**, *Geophysis, Vol. 54*, 1989

Wenzel H.-G. et al. : **Ein elektronisches Regel- und Messsystem für LaCoste-Romberg Gravimeter**, *Zeitschrift für Vermessungswesen*, 1984

Wenzel H.-G. et al. : **SRW Feedback for LaCoste-Romberg Gravitymeters with extended Range**, 1987 (IAG section 3 meeting)

WWM : **No Fifth force ?**, EOS (?)

Zürn W.: **Search for non-newtonian graavitation - a gravimetric experiment in a hydroelectric lake**, *Geophys. J. Int. 101, p.329-344*, 1990

Anhang A : Definition der Staumauer

Ursprung : $X_0 Y_0 Z_0 : 198095.300 / 748700.100 / 1200$

Lokal Koordinaten : $x \ y$ Landeskoordinaten : $X \ Y$

Azimut α der x-Achse : 101.8613°

Transformationsformeln für eine Höhe von 1200 m

$$x = ((Y - Y_0) \sin \alpha + (X - X_0) \cos \alpha) \cdot 1.000188 \quad X = X_0 + \frac{-y \sin \alpha + x \cos \alpha}{1.000188}$$

$$y = ((Y - Y_0) \cos \alpha - (X - X_0) \sin \alpha) \cdot 1.000188 \quad Y = Y_0 + \frac{y \cos \alpha + x \sin \alpha}{1.000188}$$

Definitionsgleichungen des Mittelschnittes ($y_0 = 500.000$)

- Einheit von z : Dekameter (10 m = 1 Dekameter)

Defintion Bergseite :

$$1.0 < z < 6.28 : \quad x_1 = 0.020271 z^3 - 0.062164 z^2 - 1.614382 z + 41.566136$$

$$6.28 < z < 9.5 : \quad x_1 = 0.000903 z^3 + 0.374845 z^2 - 4.964613 z + 50.167597$$

$$9.5 < z < 13.7 : \quad x_1 = 0.130885 z^2 - 0.085980 z + 26.612128$$

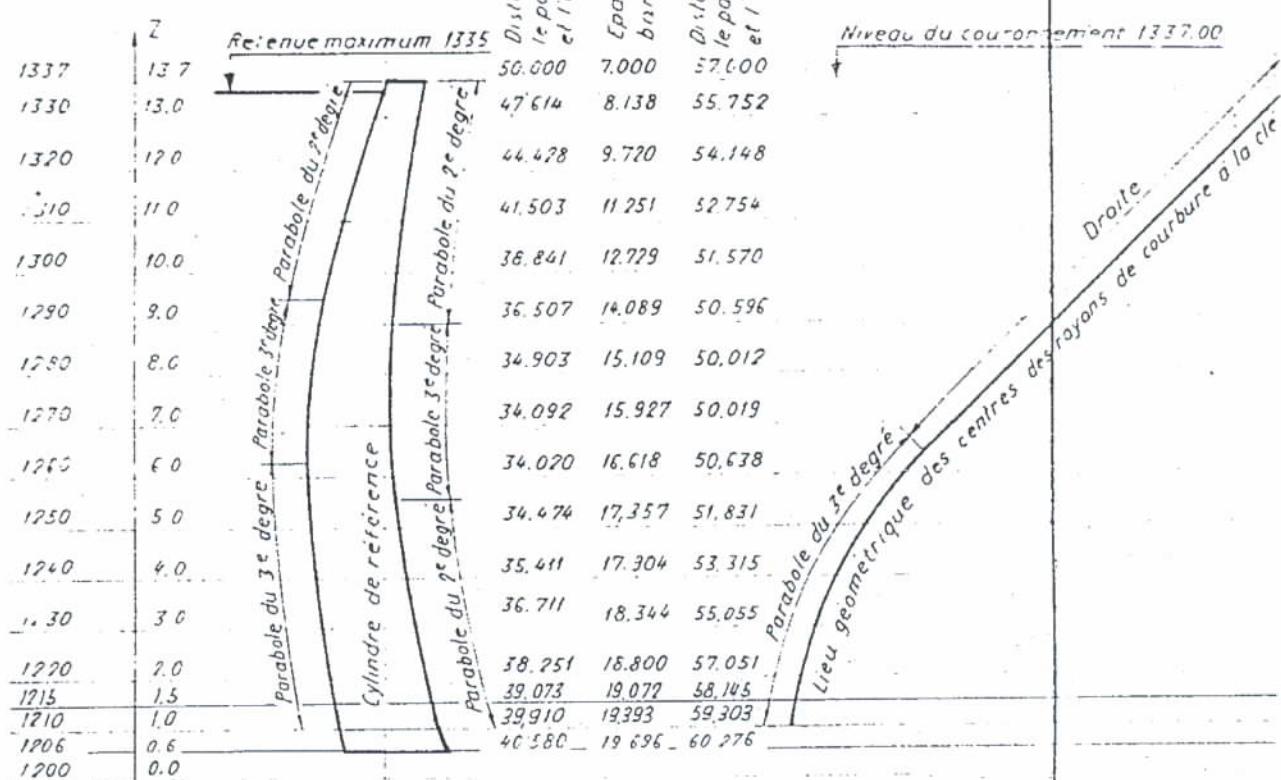
Definition Mitte :

$$1.0 < z < 6.5 : \quad x_0 = 0.071863 z^3 - 0.042118 z^2 + 1.633265 z + 127.050954$$

$$6.5 < z < 13.7 : \quad x_0 = 10.195224 z + 89.325433$$

Parabelgleichung Bergseite für $z = \text{konstant}$

$$x = \frac{(y - 500)^2}{2(x_0 - x_1)} + x_1$$



Anhang B : Punktkoordinaten

(nach Messungen des Ing.Büros Schneiders, Chur)

Ergebnisse des 6. Nivellements (-1200 m), September 1986, Staukote 1318 m

| Punkt | Höhe 1.Messung | Höhe 2.Messung | ΔH | Punkt | Höhe 1.Messung | Höhe 2.Messung | ΔH |
|-------|-------------------|-------------------|-------|-------|-------------------|-------------------|-------|
| 503 | 130789.68 | 130790.38 | +0.70 | 313 | 82787.76 | 82791.72 | +3.96 |
| 505 | 130784.42 | 130786.91 | +2.49 | 315 | 82772.65 | 82775.60 | +2.95 |
| 507 | 130758.98 | 130763.40 | +4.42 | 317 | 82781.73 | 82782.92 | +1.19 |
| 509 | 130768.09 | 130774.05 | +5.96 | 319 | 82798.04 | 82798.17 | +0.13 |
| 511 | 130798.19 | 130804.17 | +5.98 | 321 | 82801.30 | 82801.86 | +0.56 |
| 513 | 130764.73 | 130770.17 | +5.44 | 97 | 41997.52 | 41997.52 | +0.45 |
| 515 | 130744.79 | 130748.74 | +3.95 | 99 | 42308.93 | 42309.51 | +0.58 |
| 517 | 130763.65 | 130766.40 | +2.75 | 101 | 41830.50 | 41830.83 | +0.33 |
| 519 | 130761.72 | 130762.96 | +1.24 | 103 | 41321.45 | 41321.67 | +0.22 |
| 521 | 130752.30 | 130753.14 | +0.84 | 105 | 40828.35 | 40828.28 | -0.07 |
| 523 | 130764.16 | 130764.80 | +0.64 | 107 | 40750.00 | 40748.94 | -1.06 |
| 525 | 130785.02 | 130785.47 | +0.45 | 109 | 40758.62 | 40759.86 | +1.24 |
| 305 | 82793.91 | 82795.14 | +1.23 | 111 | 40772.05 | 40774.20 | +2.15 |
| 307 | 82756.59 | 82759.87 | +3.28 | 113 | 40769.49 | 40770.70 | +1.21 |
| 309 | 82758.31 | 82762.40 | +4.09 | 115 | 40778.57 | 40777.12 | -1.45 |
| 311 | 82779.79 | 82784.63 | +4.84 | | | | |

Lagekoordinaten (6. Messung, September 1986)

| Punkt | Y [m] | X [m] | H [m] | a [mm] | b [mm] | θ [gon] | (zur 1. Messung) | |
|-------|----------|----------|----------|-----------|-----------|------------|------------------|------------|
| | | | | | | | dy [mm] | dx [mm] |
| 503 | 382.8821 | 93.0513 | 130.7980 | 0.34 | 0.23 | 29.55 | -1.62 | 2.51 |
| 505 | 409.4303 | 75.4622 | 130.7837 | 0.30 | 0.20 | 25.05 | -1.88 | 4.22 |
| 507 | 437.5075 | 60.4263 | 130.7583 | 0.29 | 0.18 | 20.96 | -0.12 | 10.66 |
| 509 | 468.9554 | 55.3848 | 130.7674 | 0.29 | 0.18 | 12.35 | 0.40 | 18.43 |
| 511 | 500.4171 | 50.4069 | 130.7975 | 0.27 | 0.17 | 0.19 | 0.77 | 22.21 |
| 513 | 531.8601 | 55.4893 | 130.7641 | 0.31 | 0.18 | 187.89 | 0.11 | 21.10 |
| 515 | 563.2969 | 60.5849 | 130.7441 | 0.31 | 0.19 | 179.10 | 0.37 | 14.90 |
| 517 | 592.1056 | 74.1679 | 130.7630 | 0.31 | 0.20 | 173.56 | 2.61 | 8.77 |
| 519 | 618.0785 | 92.6071 | 130.7610 | 0.32 | 0.23 | 168.04 | 3.18 | 4.74 |
| 521 | 644.0498 | 111.0359 | 130.7516 | 0.35 | 0.25 | 164.34 | 2.57 | 2.90 |
| 523 | 665.4203 | 134.6468 | 130.7635 | 0.46 | 0.28 | 157.09 | 1.38 | 2.66 |
| 525 | 686.9502 | 158.1177 | 130.7843 | 0.62 | 0.32 | 153.78 | 1.17 | 1.93 |
| 305 | 410.6196 | 76.9799 | 82.7932 | 1.00 | 0.31 | 24.38 | 0.52 | 4.81 |
| 307 | 436.7058 | 57.5480 | 82.7559 | 0.79 | 0.25 | 16.05 | 2.78 | 11.71 |
| 309 | 468.4076 | 50.2999 | 82.7576 | 0.63 | 0.22 | 9.94 | 2.62 | 19.75 |
| 311 | 500.1844 | 43.3573 | 82.7791 | 0.52 | 0.20 | 197.93 | 1.46 | 23.35 |
| 313 | 531.9091 | 50.5170 | 82.7871 | 0.51 | 0.21 | 185.10 | -0.88 | 22.39 |
| 315 | 563.6188 | 57.7441 | 82.7720 | 0.56 | 0.22 | 175.60 | -1.32 | 15.55 |
| 317 | 589.4521 | 77.5004 | 82.7810 | 0.69 | 0.27 | 167.53 | 0.70 | 9.13 |
| 319 | 615.2272 | 97.3382 | 82.7974 | 0.86 | 0.33 | 163.66 | 1.60 | 4.95 |
| 321 | 640.5104 | 116.6941 | 82.8006 | 1.04 | 0.36 | 162.64 | 0.92 | 2.31 |
| 97 | 334.9206 | 182.9964 | 41.9969 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 99 | 354.8707 | 158.1740 | 42.3083 | 0.19 | 0.08 | 51.20 | 0.21 | 0.17 |
| 101 | 374.8648 | 133.4040 | 41.8298 | 0.25 | 0.12 | 43.70 | 0.15 | 0.32 |
| 103 | 394.8400 | 108.6210 | 41.3208 | 0.35 | 0.15 | 42.07 | -0.13 | 0.39 |
| 105 | 415.5387 | 84.4287 | 40.8277 | 0.35 | 0.17 | 31.29 | -0.75 | 0.94 |
| 107 | 442.3454 | 67.2389 | 40.7493 | 0.37 | 0.19 | 20.91 | -0.49 | 5.42 |
| 109 | 469.2961 | 50.2753 | 40.7580 | 0.40 | 0.20 | 10.06 | 1.39 | 10.42 |
| 111 | 500.5718 | 44.2647 | 40.7714 | 0.42 | 0.22 | 199.41 | 0.83 | 13.50 |
| 113 | 531.8269 | 50.4150 | 40.7688 | 0.48 | 0.24 | 189.16 | -0.01 | 12.94 |

Anhang C : Lotabweichungen infolge Wasserspiegel des Sees

| Code | y | x | h | Wasser | $g_y [\mu\text{gal}]$ | $l_y [\text{cc}]$ | $g_x [\mu\text{gal}]$ | $l_x [\text{cc}]$ |
|------|---------|---------|---------|--------|-----------------------|-------------------|-----------------------|-------------------|
| 503 | 382.882 | 93.051 | 130.789 | 49. | 28. | 0.02 | -14. | -0.01 |
| | | | | 89. | 241. | 0.16 | -116. | -0.08 |
| | | | | 137. | 526. | 0.34 | -366. | -0.24 |
| 505 | 409.430 | 75.462 | 130.78 | 49. | 433. | 0.02 | -25. | -0.02 |
| | | | | 89. | 271. | 0.18 | -231. | -0.15 |
| | | | | 137. | 434. | 0.28 | -634. | -0.41 |
| 507 | 437.507 | 60.426 | 130.758 | 49. | 34. | 0.02 | -40. | -0.03 |
| | | | | 89. | 255. | 0.17 | -358. | -0.23 |
| | | | | 137. | 331. | 0.22 | -889. | -0.58 |
| 509 | 468.955 | 55.385 | 130.76 | 49. | 726. | 0.02 | -57. | -0.04 |
| | | | | 89. | 177. | 0.12 | -436. | -0.28 |
| | | | | 137. | 277. | 0.18 | -887. | -0.58 |
| 511 | 500.417 | 50.407 | 130.797 | 49. | 11. | 0.01 | -69. | -0.04 |
| | | | | 89. | 89. | 0.06 | -488. | -0.32 |
| | | | | 137. | 235. | 0.15 | -1011. | -0.66 |
| 513 | 531.860 | 55.489 | 130.764 | 49. | -7. | 0.00 | -70. | -0.05 |
| | | | | 89. | -13. | -0.01 | -482. | -0.31 |
| | | | | 137. | 185. | 0.12 | -938. | -0.61 |
| 515 | 563.297 | 60.585 | 130.744 | 49. | -22. | -0.01 | -59. | -0.04 |
| | | | | 89. | -120. | -0.08 | -443. | -0.29 |
| | | | | 137. | 143. | 0.09 | -989. | -0.64 |
| 517 | 592.106 | 74.168 | 130.763 | 49. | -28. | -0.02 | -39. | -0.03 |
| | | | | 89. | -194. | -0.13 | -339. | -0.22 |
| | | | | 137. | 44. | 0.03 | -835. | -0.54 |
| 519 | 618.078 | 92.607 | 130.761 | 49. | -26. | -0.02 | -23. | -0.01 |
| | | | | 89. | -214. | -0.14 | -206. | -0.13 |
| | | | | 137. | -98. | -0.06 | -598. | -0.39 |
| 521 | 644.050 | 111.036 | 130.752 | 49. | -23. | -0.01 | -13. | -0.01 |
| | | | | 89. | -198. | -0.13 | -104. | -0.07 |
| | | | | 139. | -235. | -0.15 | -426. | -0.28 |
| 523 | 665.420 | 134.647 | 130.763 | 49. | -19. | -0.01 | -8. | -0.01 |
| | | | | 89. | -162. | -0.11 | -53. | -0.03 |
| | | | | 137. | -398. | -0.26 | -162. | -0.10 |
| 525 | 686.950 | 158.118 | 130.784 | 49. | -16. | -0.01 | -5. | 0.00 |
| | | | | 89. | -135. | -0.09 | -30. | -0.02 |
| | | | | 137. | -421. | -0.27 | -53. | -0.03 |
| 305 | 410.620 | 76.980 | 82.793 | 49. | 50. | 0.03 | -17. | -0.01 |
| | | | | 89. | 375. | 0.24 | -78. | -0.05 |
| | | | | 139. | 709. | 0.46 | -474. | -0.31 |
| 307 | 436.706 | 57.548 | 82.756 | 49. | 63. | 0.04 | -53. | -0.03 |
| | | | | 89. | 266. | 0.17 | -306. | -0.20 |
| | | | | 137. | 494. | 0.32 | -829. | -0.54 |
| 309 | 468.408 | 50.300 | 82.758 | 49. | 46. | 0.03 | -82. | -0.05 |
| | | | | 89. | 170. | 0.11 | -323. | -0.21 |
| | | | | 137. | 333. | 0.22 | -846. | -0.55 |
| 311 | 500.184 | 43.357 | 82.779 | 49. | 23. | 0.01 | -103. | -0.07 |
| | | | | 89. | 133. | 0.09 | -403. | -0.26 |
| | | | | 137. | 280. | 0.18 | -986. | -0.64 |

| | | | | | | | | |
|-----|---------|---------|--------|------|-------|-------|--------|-------|
| 313 | 531.909 | 50.517 | 82.787 | 49. | -13. | -0.01 | -98. | -0.06 |
| | | | | 89. | 73. | 0.05 | -346. | -0.23 |
| | | | | 137. | 210. | 0.14 | -871. | -0.57 |
| 315 | 563.619 | 57.744 | 82.772 | 49. | -48. | -0.03 | -72. | -0.05 |
| | | | | 89. | -24. | -0.02 | -350. | -0.23 |
| | | | | 137. | 87. | 0.06 | -884. | -0.57 |
| 317 | 589.452 | 77.500 | 82.781 | 49. | -45. | -0.03 | -25. | -0.02 |
| | | | | 89. | -169. | -0.11 | -142. | -0.09 |
| | | | | 137. | -129. | -0.08 | -572. | -0.37 |
| 319 | 615.227 | 97.338 | 82.797 | 49. | -35. | -0.02 | -9. | -0.01 |
| | | | | 89. | -252. | -0.16 | -35. | -0.02 |
| | | | | 137. | -347. | -0.23 | -412. | -0.27 |
| 321 | 640.510 | 116.694 | 82.801 | 49. | -28. | -0.02 | -4. | 0.00 |
| | | | | 89. | -227. | -0.15 | -9. | -0.01 |
| | | | | 137. | -480. | -0.31 | -306. | -0.20 |
| 97 | 334.921 | 182.996 | 41.997 | 49. | 16. | 0.01 | 0. | 0.00 |
| | | | | 89. | 121. | 0.08 | -5. | 0.00 |
| | | | | 137. | 315. | 0.20 | -53. | -0.03 |
| 99 | 354.871 | 158.174 | 42.308 | 49. | 20. | 0.01 | 0. | 0.00 |
| | | | | 89. | 147. | 0.10 | -9. | -0.01 |
| | | | | 137. | 370. | 0.24 | -93. | -0.06 |
| 101 | 374.865 | 133.404 | 41.830 | 49. | 26. | 0.02 | 0. | 0.00 |
| | | | | 89. | 184. | 0.12 | -19. | -0.01 |
| | | | | 137. | 437. | 0.28 | -168. | -0.11 |
| 103 | 394.840 | 108.621 | 41.321 | 49. | 36. | 0.02 | 0. | 0.00 |
| | | | | 89. | 239. | 0.16 | -47. | -0.03 |
| | | | | 137. | 518. | 0.34 | -300. | -0.19 |
| 105 | 415.539 | 84.429 | 40.828 | 49. | 55. | 0.04 | -1. | 0.00 |
| | | | | 89. | 317. | 0.21 | -138. | -0.09 |
| | | | | 137. | 605. | 0.39 | -520. | -0.34 |
| 107 | 442.345 | 67.239 | 40.749 | 49. | 58. | 0.04 | -10. | -0.01 |
| | | | | 89. | 288. | 0.19 | -290. | -0.19 |
| | | | | 137. | 536. | 0.35 | -768. | -0.50 |
| 109 | 469.296 | 50.275 | 40.758 | 49. | 27. | 0.02 | -19. | -0.01 |
| | | | | 89. | 187. | 0.12 | -411. | -0.27 |
| | | | | 137. | 385. | 0.25 | -961. | -0.62 |
| 111 | 500.572 | 44.265 | 40.771 | 49. | 28. | 0.02 | -23. | -0.01 |
| | | | | 89. | 132. | 0.09 | -453. | -0.29 |
| | | | | 137. | 254. | 0.16 | -1029. | -0.67 |
| 113 | 531.827 | 50.415 | 40.769 | 49. | 15. | 0.01 | -20. | -0.01 |
| | | | | 89. | 49. | 0.03 | -424. | -0.28 |
| | | | | 137. | 93. | 0.06 | -990. | -0.64 |

Anhang D : Gravimetrische Messungen

Messungen mit Wasserständen

| | | | | | |
|------|-----|------|---------|---------|----------|
| | 89- | 4-27 | 0 | d16 | 1.000000 |
| 1331 | | 1123 | 100.117 | 1262.00 | |
| 1241 | | 1148 | 109.364 | 1262.04 | |
| 1331 | | 1217 | 99.674 | 1262.06 | |
| 1331 | | 1220 | 99.740 | 1262.08 | |
| 1331 | | 1246 | 99.997 | 1262.10 | |
| | 89- | 4-27 | 0 | d86 | 1.000000 |
| 1331 | | 1128 | 100.336 | 1262.01 | |
| 1331 | | 1145 | 100.353 | 1262.03 | |
| 1331 | | 1147 | 100.353 | 1262.04 | |
| 1241 | | 1224 | 111.750 | 1262.08 | |
| 1241 | | 1226 | 111.747 | 1262.08 | |
| 1331 | | 1251 | 100.325 | 1262.10 | |
| | 89- | 5-11 | 0 | d86 | 1.000000 |
| 1331 | | 1037 | 100.775 | 1283.90 | |
| 1331 | | 1040 | 100.770 | 1283.90 | |
| 1331 | | 1042 | 100.774 | 1283.90 | |
| 1241 | | 1104 | 111.706 | 1283.91 | |
| 1241 | | 1108 | 111.700 | 1283.91 | |
| 1241 | | 1111 | 111.700 | 1283.92 | |
| 1331 | | 1131 | 100.773 | 1283.96 | |
| 1331 | | 1138 | 100.749 | 1283.96 | |
| 1331 | | 1140 | 100.759 | 1283.96 | |
| 1331 | | 1142 | 100.751 | 1283.97 | |
| 1241 | | 1203 | 111.693 | 1284.01 | |
| 1241 | | 1206 | 111.687 | 1284.02 | |
| 1241 | | 1209 | 111.675 | 1284.03 | |
| 1241 | | 1212 | 111.665 | 1284.04 | |
| 1331 | | 1233 | 100.714 | 1284.05 | |
| 1331 | | 1235 | 100.713 | 1284.05 | |
| 1331 | | 1237 | 100.716 | 1284.06 | |
| | 89- | 5-25 | 0 | d86 | 1.000000 |
| 1331 | | 954 | 99.930 | 1308.77 | |
| 1331 | | 957 | 99.921 | 1308.77 | |
| 1331 | | 959 | 99.918 | 1308.78 | |
| 1331 | | 959 | 99.922 | 1308.78 | |
| 1241 | | 1018 | 110.272 | 1308.78 | |
| 1241 | | 1020 | 110.270 | 1308.79 | |
| 1241 | | 1024 | 110.263 | 1308.80 | |
| 1331 | | 1039 | 99.923 | 1308.80 | |
| 1331 | | 1043 | 99.915 | 1308.81 | |
| 1331 | | 1045 | 99.912 | 1308.81 | |
| 1331 | | 1046 | 99.919 | 1308.82 | |
| 1331 | | 1247 | 99.864 | 1309.00 | |
| 1331 | | 1230 | 99.859 | 1309.01 | |
| 1331 | | 1233 | 99.853 | 1309.02 | |
| 1241 | | 1252 | 110.188 | 1309.05 | |
| 1241 | | 1255 | 110.179 | 1309.05 | |
| 1241 | | 1257 | 110.178 | 1309.06 | |
| 1331 | | 1317 | 99.877 | 1309.09 | |
| 1331 | | 1320 | 99.871 | 1309.09 | |
| 1331 | | 1321 | 99.873 | 1309.10 | |
| | 89- | 6- 7 | 0 | d86 | 1.000000 |
| 1331 | | 923 | 101.245 | 1306.89 | |
| 1331 | | 925 | 101.233 | 1306.87 | |
| 1331 | | 927 | 101.232 | 1306.86 | |
| 1241 | | 945 | 111.643 | 1306.78 | |

| | | | |
|-------------------------|------|---------|---------|
| 1241 | 947 | 111.632 | 1306.76 |
| 1241 | 948 | 111.632 | 1306.75 |
| 1331 | 1004 | 101.244 | 1306.68 |
| 1331 | 1007 | 101.233 | 1306.67 |
| 1331 | 1008 | 101.227 | 1306.66 |
| 90- 5-23 0 d16 1.000000 | | | |
| 1331 | 827 | 102.255 | 1321.66 |
| 1331 | 831 | 102.278 | 1321.64 |
| 1331 | 948 | 102.238 | 1321.41 |
| 1331 | 921 | 102.240 | 1321.40 |
| 1331 | 922 | 102.240 | 1321.39 |
| 1331 | 923 | 102.242 | 1321.38 |
| 1241 | 951 | 111.495 | 1321.23 |
| 1241 | 953 | 111.501 | 1321.22 |
| 1241 | 955 | 111.499 | 1321.21 |
| 1241 | 956 | 111.504 | 1321.20 |
| 1331 | 1014 | 102.227 | 1321.14 |
| 1331 | 1015 | 102.231 | 1321.14 |
| 1331 | 1016 | 102.232 | 1321.13 |
| 1331 | 1017 | 102.239 | 1321.12 |
| 1331 | 1209 | 102.232 | 1320.77 |
| 1331 | 1210 | 102.232 | 1320.77 |
| 1331 | 1213 | 102.238 | 1320.76 |
| 1331 | 1215 | 102.241 | 1320.76 |
| 1241 | 1240 | 111.552 | 1320.72 |
| 1241 | 1241 | 111.557 | 1320.72 |
| 1241 | 1242 | 111.563 | 1320.71 |
| 1241 | 1243 | 111.565 | 1320.71 |
| 1331 | 1305 | 102.331 | 1320.66 |
| 1331 | 1306 | 102.322 | 1320.66 |
| 1331 | 1307 | 102.328 | 1320.66 |
| 1331 | 1308 | 102.329 | 1320.66 |
| 90- 5-23 0 d86 1.000000 | | | |
| 1331 | 819 | 98.371 | 1321.70 |
| 1331 | 823 | 98.362 | 1321.68 |
| 1331 | 909 | 98.355 | 1321.45 |
| 1331 | 910 | 98.348 | 1321.45 |
| 1331 | 914 | 98.340 | 1321.43 |
| 1331 | 916 | 98.332 | 1321.42 |
| 1241 | 944 | 108.245 | 1321.27 |
| 1241 | 946 | 108.233 | 1321.26 |
| 1241 | 948 | 108.292 | 1321.25 |
| 1241 | 949 | 108.289 | 1321.24 |
| 1331 | 1020 | 98.283 | 1321.10 |
| 1331 | 1021 | 98.274 | 1321.09 |
| 1331 | 1024 | 98.270 | 1321.08 |
| 1331 | 1025 | 98.272 | 1321.08 |
| 1331 | 1203 | 98.313 | 1320.79 |
| 1331 | 1204 | 98.310 | 1320.79 |
| 1331 | 1206 | 98.316 | 1320.78 |
| 1331 | 1207 | 98.303 | 1320.78 |
| 1241 | 1230 | 108.352 | 1320.74 |
| 1241 | 1231 | 108.351 | 1320.74 |
| 1241 | 1233 | 108.349 | 1320.73 |
| 1241 | 1235 | 108.347 | 1320.73 |
| 1331 | 1300 | 98.314 | 1320.68 |
| 1331 | 1301 | 98.316 | 1320.68 |
| 1331 | 1302 | 98.314 | 1320.67 |
| 1331 | 1303 | 98.311 | 1320.67 |
| 90- 6- 7 0 d86 1.000000 | | | |
| 1331 | 827 | 98.758 | 1321.58 |
| 1331 | 830 | 98.743 | 1321.57 |
| 1331 | 833 | 98.738 | 1321.56 |

| | | | |
|------|-----------------|----------|----------------|
| 1331 | 834 | 98.736 | 1321.55 |
| 1241 | 854 | 108.748 | 1321.44 |
| 1241 | 857 | 108.740 | 1321.43 |
| 1241 | 859 | 108.734 | 1321.42 |
| 1241 | 900 | 108.729 | 1321.41 |
| 1331 | 920 | 98.722 | 1321.32 |
| 1331 | 922 | 98.710 | 1321.31 |
| 1331 | 924 | 98.706 | 1321.31 |
| 1331 | 925 | 98.704 | 1321.30 |
| 1241 | 943 | 108.775 | 1321.23 |
| 1241 | 944 | 108.766 | 1321.23 |
| 1241 | 947 | 108.762 | 1321.22 |
| 1241 | 949 | 108.760 | 1321.21 |
| 1331 | 1007 | 98.752 | 1321.16 |
| 1331 | 1009 | 98.750 | 1321.15 |
| 1331 | 1011 | 98.750 | 1321.14 |
| 1331 | 1012 | 98.747 | 1321.13 |
| | 90- 6- 7 0 e839 | 1.000000 | |
| 1331 | 822 | 3832.430 | 3.574 1321.59 |
| 1241 | 850 | 3832.430 | -7.759 1321.46 |
| 1331 | 917 | 3832.430 | 3.565 1321.33 |
| 1241 | 940 | 3832.430 | -7.798 1321.24 |
| 1331 | 1002 | 3832.430 | 3.604 1321.17 |
| | 94- 5- 6 0 g514 | 1.000000 | |
| 1331 | 830 | 3793.667 | 1292.21 |
| 1331 | 832 | 3793.643 | 1292.20 |
| 1331 | 833 | 3793.661 | 1292.20 |
| 1331 | 835 | 3793.649 | 1292.19 |
| 1241 | 910 | 3805.886 | 1291.98 |
| 1241 | 913 | 3805.867 | 1291.97 |
| 1241 | 917 | 3805.830 | 1291.95 |
| 1241 | 921 | 3805.831 | 1291.93 |
| 1241 | 922 | 3805.826 | 1291.92 |
| 1331 | 957 | 3793.659 | 1291.75 |
| 1331 | 959 | 3793.640 | 1291.74 |
| 1331 | 1000 | 3793.649 | 1291.73 |
| | 94- 5- 6 0 e839 | 1.000000 | |
| 1331 | 842 | 3841.000 | 5.338 1292.15 |
| 1331 | 846 | 3841.000 | 5.342 1292.13 |
| 1241 | 928 | 3841.000 | -6.907 1291.90 |
| 1241 | 930 | 3841.000 | -6.901 1291.89 |
| 1241 | 933 | 3850.000 | 2.136 1291.87 |
| 1241 | 936 | 3841.000 | -6.886 1291.86 |
| 1331 | 1008 | 3841.000 | 5.357 1291.67 |
| 1331 | 1010 | 3841.000 | 5.359 1291.66 |
| 1331 | 1140 | 3841.000 | 5.408 1291.25 |
| 1331 | 1142 | 3841.000 | 5.408 1291.24 |
| 1241 | 1215 | 3841.000 | -6.916 1291.05 |
| 1241 | 1219 | 3841.000 | -6.907 1291.03 |
| 1241 | 1225 | 3850.000 | 2.073 1291.00 |
| 1241 | 1231 | 3841.000 | -6.961 1290.97 |
| 1241 | 1234 | 3850.000 | 2.060 1290.95 |
| 1241 | 1237 | 3841.000 | -6.970 1290.94 |
| 1241 | 1241 | 3840.995 | -6.970 1290.92 |
| 1331 | 1300 | 3840.995 | 5.292 1290.82 |
| 1331 | 1304 | 3840.995 | 5.288 1290.80 |
| | 94- 6- 2 0 g514 | 1.000000 | |
| 1331 | 846 | 3793.881 | 1298.58 |
| 1331 | 851 | 3793.890 | 1298.57 |
| 1331 | 853 | 3793.880 | 1298.56 |
| 1241 | 936 | 3806.002 | 1298.54 |
| 1241 | 937 | 3806.009 | 1298.53 |

| | | | |
|------|--------|----------|---------------|
| 1241 | 939 | 3805.991 | 1298.52 |
| 1331 | 1007 | 3793.962 | 1298.44 |
| 1331 | 1010 | 3793.943 | 1298.44 |
| 1331 | 1013 | 3793.973 | 1298.43 |
| 1331 | 1015 | 3793.921 | 1298.43 |
| 1331 | 1016 | 3793.920 | 1298.42 |
| 1331 | 1017 | 3793.920 | 1298.42 |
| | 94- 6- | 2 0 | g839 1.000000 |
| 1331 | 914 | 3839.398 | 1298.56 |
| 1331 | 916 | 3839.392 | 1298.56 |
| 1241 | 945 | 3851.572 | 1298.50 |
| 1241 | 947 | 3851.560 | 1298.49 |
| 1241 | 949 | 3851.562 | 1298.48 |
| 1331 | 1027 | 3839.488 | 1298.40 |
| 1331 | 1029 | 3839.471 | 1298.40 |
| 1331 | 1030 | 3839.461 | 1298.39 |
| 1331 | 1032 | 3839.479 | 1298.39 |

Ausgleichungsrechnung

- Gravity Measurements (version 4)

sigma0 a posteriori : 1.00 n : 154 u : 21 dof : 133

estimations for mean errors of single measurements of meters

| | | | | | | | | |
|----------|--------|-------|--------|-------|-------|------|---------|------|
| s(d86) | a pr : | 14.00 | a po : | 14.01 | dof : | 77.6 | po/pr : | 1.00 |
| s(d16) | a pr : | 15.26 | a po : | 15.19 | dof : | 20.5 | po/pr : | 1.00 |
| s(e839) | a pr : | 19.47 | a po : | 19.42 | dof : | 17.2 | po/pr : | 1.00 |
| s(g514) | a pr : | 20.30 | a po : | 19.05 | dof : | 12.3 | po/pr : | 0.94 |
| s(g839) | a pr : | 20.08 | a po : | 21.77 | dof : | 5.5 | po/pr : | 1.08 |

adjusted values of the gravity stations

| base | value [mgal] | n. of meas. | deg.of free. | sigma a post. |
|------|-----------------|----------------|-----------------|------------------|
| 1331 | 0.000 | 95 | 84.0 | 0.99 |

| station | value [mgal] | m.err. [micro] | n. of meas. | deg.of free. | sigma a post. | max. corr. |
|---------|-----------------|-------------------|----------------|-----------------|------------------|------------|
| 1241.1 | 13.256 | 12.1 | 2 | 1.0 | 0.13 | -0.58 |
| 1241.2 | 13.257 | 6.9 | 7 | 6.0 | 0.70 | -0.64 |
| 1241.3 | 13.269 | 6.8 | 6 | 5.0 | 0.96 | -0.55 |
| 1241.4 | 13.285 | 9.9 | 3 | 2.0 | 0.49 | -0.58 |
| 1241.5 | 13.236 | 4.9 | 14 | 12.7 | 1.23 | -0.48 |
| 1241.6 | 13.242 | 6.1 | 10 | 8.2 | 1.12 | -0.52 |
| 1241.7 | 13.240 | 8.7 | 11 | 9.7 | 0.76 | -0.72 |
| 1241.8 | 13.266 | 11.3 | 6 | 4.5 | 1.21 | -0.56 |

stations measured, but not in the station-file

none

improvements (order by sets)

| | | | | | |
|--------------|---------|----------|----------|---------|-------|
| gravimeter : | d86 | factor : | 1.000000 | drift : | 0.000 |
| s : | 1 | code : | 0 | dof : | 4.0 |
| const : | 116.509 | si : | 0.81 | | |

| station c | time [y.m.d] | (GMT) [h.m] | reading [ins.un] | height [m] | volt [volt] | p | v (v/si) | f | tide [mgal] |
|--------------|-----------------|----------------|---------------------|---------------|----------------|-----|-------------|------|----------------|
| 1331 | 89- 4-27 | 1128 | 100.336 | -0.003 | - | 1.0 | 19.2 | 1.6 | 0.010 |
| 1331 | 89- 4-27 | 1145 | 100.353 | -0.003 | - | 1.0 | -7.9 | -0.6 | 0.018 |
| 1331 | 89- 4-27 | 1147 | 100.353 | -0.003 | - | 1.0 | -8.7 | -0.7 | 0.019 |
| 1241.1 | 89- 4-27 | 1224 | 111.750 | 0.003 | - | 1.0 | -1.3 | -0.1 | 0.034 |
| 1241.1 | 89- 4-27 | 1226 | 111.747 | 0.003 | - | 1.0 | 1.3 | 0.1 | 0.035 |
| 1331 | 89- 4-27 | 1251 | 100.325 | -0.003 | - | 1.0 | -2.6 | -0.2 | 0.045 |

gravimeter : d86 factor : 1.000000 drift : 0.000

s : 2 code : 0 dof : 15.0 si : 1.10
const : 116.707

| station c | time [y.m.d] | (GMT) [h.m] | reading [ins.un] | height [m] | volt [volt] | p | v (v/si) | f | tide [mgal] |
|--------------|-----------------|----------------|---------------------|---------------|----------------|-----|-------------|------|----------------|
| 1331 | 89- 5-11 | 1037 | 100.775 | -0.826 | - | 1.0 | -20.7 | -1.6 | -0.017 |
| 1331 | 89- 5-11 | 1040 | 100.770 | -0.826 | - | 1.0 | -5.9 | -0.4 | -0.016 |
| 1331 | 89- 5-11 | 1042 | 100.774 | -0.826 | - | 1.0 | -11.1 | -0.8 | -0.015 |
| 1241.2 | 89- 5-11 | 1104 | 111.706 | 0.969 | - | 1.0 | -5.9 | -0.5 | -0.008 |
| 1241.2 | 89- 5-11 | 1108 | 111.700 | 0.969 | - | 1.0 | -0.2 | 0.0 | -0.007 |
| 1241.2 | 89- 5-11 | 1111 | 111.700 | 0.969 | - | 1.0 | -1.1 | -0.1 | -0.006 |
| 1331 | 89- 5-11 | 1131 | 100.773 | -0.830 | - | 1.0 | -23.8 | -1.8 | 0.000 |
| 1331 | 89- 5-11 | 1138 | 100.749 | -0.830 | - | 1.0 | 1.8 | 0.1 | 0.002 |
| 1331 | 89- 5-11 | 1140 | 100.759 | -0.830 | - | 1.0 | -10.5 | -0.8 | 0.003 |
| 1331 | 89- 5-11 | 1142 | 100.751 | -0.830 | - | 1.0 | -1.9 | -0.1 | 0.004 |
| 1241.2 | 89- 5-11 | 1203 | 111.693 | 0.975 | - | 1.0 | -11.8 | -0.9 | 0.011 |
| 1241.2 | 89- 5-11 | 1206 | 111.687 | 0.975 | - | 1.0 | -5.8 | -0.4 | 0.012 |
| 1241.2 | 89- 5-11 | 1209 | 111.675 | 0.975 | - | 1.0 | 7.1 | 0.5 | 0.013 |
| 1241.2 | 89- 5-11 | 1212 | 111.665 | 0.975 | - | 1.0 | 17.7 | 1.4 | 0.014 |
| 1331 | 89- 5-11 | 1233 | 100.714 | -0.833 | - | 1.0 | 25.1 | 1.9 | 0.021 |
| 1331 | 89- 5-11 | 1235 | 100.713 | -0.833 | - | 1.0 | 25.6 | 1.9 | 0.021 |
| 1331 | 89- 5-11 | 1237 | 100.716 | -0.833 | - | 1.0 | 21.4 | 1.6 | 0.022 |

gravimeter : d86 factor : 1.000000 drift : 0.000

s : 3 code : 0 dof : 18.0 si : 0.99
const : 115.424

| station c | time [y.m.d] | (GMT) [h.m] | reading [ins.un] | height [m] | volt [volt] | p | v (v/si) | f | tide [mgal] |
|--------------|-----------------|----------------|---------------------|---------------|----------------|-----|-------------|------|----------------|
| 1331 | 89- 5-25 | 954 | 99.930 | -1.909 | - | 1.0 | 6.1 | 0.5 | -0.002 |
| 1331 | 89- 5-25 | 957 | 99.921 | -1.909 | - | 1.0 | 14.9 | 1.1 | 0.000 |
| 1331 | 89- 5-25 | 959 | 99.918 | -1.909 | - | 1.0 | 17.3 | 1.3 | 0.001 |
| 1331 | 89- 5-25 | 959 | 99.922 | -1.909 | - | 1.0 | 12.7 | 0.9 | 0.001 |
| 1241.3 | 89- 5-25 | 1018 | 110.272 | 2.207 | - | 1.0 | -14.4 | -1.1 | 0.011 |
| 1241.3 | 89- 5-25 | 1020 | 110.270 | 2.207 | - | 1.0 | -13.2 | -1.0 | 0.012 |
| 1241.3 | 89- 5-25 | 1024 | 110.263 | 2.207 | - | 1.0 | -7.3 | -0.6 | 0.014 |
| 1331 | 89- 5-25 | 1039 | 99.923 | -1.909 | - | 1.0 | -10.4 | -0.8 | 0.023 |
| 1331 | 89- 5-25 | 1043 | 99.915 | -1.909 | - | 1.0 | -3.3 | -0.2 | 0.025 |
| 1331 | 89- 5-25 | 1045 | 99.912 | -1.909 | - | 1.0 | -0.9 | -0.1 | 0.026 |
| 1331 | 89- 5-25 | 1046 | 99.919 | -1.909 | - | 1.0 | -9.6 | -0.7 | 0.027 |
| 1331 | 89- 5-25 | 1247 | 99.864 | -1.918 | - | 1.0 | 0.2 | 0.0 | 0.083 |
| 1331 | 89- 5-25 | 1230 | 99.859 | -1.918 | - | 1.0 | 12.2 | 0.9 | 0.077 |
| 1331 | 89- 5-25 | 1233 | 99.853 | -1.918 | - | 1.0 | 18.0 | 1.3 | 0.078 |
| 1241.3 | 89- 5-25 | 1252 | 110.188 | 2.220 | - | 1.0 | 5.1 | 0.4 | 0.085 |
| 1241.3 | 89- 5-25 | 1255 | 110.179 | 2.220 | - | 1.0 | 14.6 | 1.1 | 0.086 |
| 1241.3 | 89- 5-25 | 1257 | 110.178 | 2.220 | - | 1.0 | 15.2 | 1.2 | 0.087 |
| 1331 | 89- 5-25 | 1317 | 99.877 | -1.922 | - | 1.0 | -22.4 | -1.7 | 0.092 |
| 1331 | 89- 5-25 | 1320 | 99.871 | -1.922 | - | 1.0 | -16.2 | -1.2 | 0.093 |
| 1331 | 89- 5-25 | 1321 | 99.873 | -1.922 | - | 1.0 | -18.7 | -1.4 | 0.093 |

gravimeter : d86 factor : 1.000000 drift : 0.000

s : 4 code : 0 dof : 7.0 si : 0.94
 const : 116.971

| station | time | (GMT) | reading | height | volt | p | v | f | tide |
|---------|----------|-------|----------|--------|--------|--------|--------|------|--------|
| c | [y.m.d] | [h.m] | [ins.un] | [m] | [volt] | (v/si) | [mgal] | | |
| 1331 | 89- 6- 7 | 923 | 101.245 | -1.828 | - | 1.0 | 4.6 | 0.4 | -0.005 |
| 1331 | 89- 6- 7 | 925 | 101.233 | -1.824 | - | 1.0 | 16.1 | 1.3 | -0.004 |
| 1331 | 89- 6- 7 | 927 | 101.232 | -1.824 | - | 1.0 | 16.1 | 1.3 | -0.003 |
| 1241.4 | 89- 6- 7 | 945 | 111.643 | 2.103 | - | 1.0 | -7.8 | -0.7 | 0.008 |
| 1241.4 | 89- 6- 7 | 947 | 111.632 | 2.103 | - | 1.0 | 3.8 | 0.3 | 0.009 |
| 1241.4 | 89- 6- 7 | 948 | 111.632 | 2.100 | - | 1.0 | 4.1 | 0.4 | 0.010 |
| 1331 | 89- 6- 7 | 1004 | 101.244 | -1.818 | - | 1.0 | -21.4 | -1.7 | 0.019 |
| 1331 | 89- 6- 7 | 1007 | 101.233 | -1.818 | - | 1.0 | -10.4 | -0.8 | 0.021 |
| 1331 | 89- 6- 7 | 1008 | 101.227 | -1.815 | - | 1.0 | -5.0 | -0.4 | 0.021 |

gravimeter : d16 factor : 1.000000 drift : 0.000

s : 5 code : 0 dof : 20.5 si : 1.00
 const : 127.135

| station | time | (GMT) | reading | height | volt | p | v | f | tide |
|---------|------------|-------|----------|--------|--------|--------|--------|------|-------|
| c | [y.m.d] | [h.m] | [ins.un] | [m] | [volt] | (v/si) | [mgal] | | |
| 1331 | 90- 5-23 | 827 | 102.255 | -2.417 | - | 1.0 | 7.3 | 0.5 | 0.106 |
| 1331 | 90- 5-23 | 831 | 102.278 | -2.417 | - | 1.0 | -24.2 | -1.6 | 0.108 |
| 1331 | 90- 5-23 | 948 | 102.238 | -2.411 | - | 1.0 | -14.9 | -1.0 | 0.147 |
| 1331 | 90- 5-23 | 921 | 102.240 | -2.411 | - | 1.0 | -7.5 | -0.5 | 0.137 |
| 1331 | 90- 5-23 | 922 | 102.240 | -2.408 | - | 1.0 | -8.9 | -0.6 | 0.138 |
| 1331 | 90- 5-23 | 923 | 102.242 | -2.408 | - | 1.0 | -11.8 | -0.8 | 0.138 |
| 1241.5 | 90- 5-23 | 951 | 111.495 | 2.855 | - | 1.0 | 28.4 | 2.0 | 0.148 |
| 1241.5 | 90- 5-23 | 953 | 111.501 | 2.855 | - | 1.0 | 20.4 | 1.4 | 0.149 |
| 1241.5 | 90- 5-23 | 955 | 111.499 | 2.852 | - | 1.0 | 23.4 | 1.6 | 0.149 |
| 1241.5 | 90- 5-23 | 956 | 111.504 | 2.852 | - | 1.0 | 16.9 | 1.2 | 0.149 |
| 1331 | 90- 5-23 | 1014 | 102.227 | -2.401 | - | 1.0 | -9.5 | -0.6 | 0.153 |
| 1331 | 90- 5-23 | 1015 | 102.231 | -2.401 | - | 1.0 | -14.6 | -1.0 | 0.153 |
| 1331 | 90- 5-23 | 1016 | 102.232 | -2.401 | - | 1.0 | -16.0 | -1.1 | 0.153 |
| 1331 | 90- 5-23 | 1017 | 102.239 | -2.401 | - | 1.0 | -24.8 | -1.7 | 0.153 |
| 1331 | 90- 5-23 | 1209 | 102.232 | -2.388 | - | 1.0 | 9.1 | 0.6 | 0.124 |
| 1331 | 90- 5-23 | 1210 | 102.232 | -2.388 | - | 1.0 | 9.6 | 0.7 | 0.123 |
| 1331 | 90- 5-23 | 1213 | 102.238 | -2.388 | - | 1.0 | 3.9 | 0.3 | 0.121 |
| 1331 | 90- 5-23 | 1215 | 102.241 | -2.388 | - | 1.0 | 1.4 | 0.1 | 0.120 |
| 1241.5 | 90- 5-23 | 1240 | 111.552 | 2.826 | - | 1.0 | 10.9 | 0.8 | 0.103 |
| 1241.5 | 90- 5-23 | 1241 | 111.557 | 2.826 | - | 1.0 | 5.4 | 0.4 | 0.103 |
| 1241.5 | 90- 5-23 | 1242 | 111.563 | 2.826 | - | 1.0 | -1.3 | -0.1 | 0.102 |
| 1241.5 | 90- 5-23 | 1243 | 111.565 | 2.826 | - | 1.0 | -3.1 | -0.2 | 0.101 |
| 1331 | r 90- 5-23 | 1305 | 102.331 | -2.385 | - | 1.0 | -76.1 | | |
| 1331 | r 90- 5-23 | 1306 | 102.322 | -2.385 | - | 1.0 | -64.0 | | |
| 1331 | r 90- 5-23 | 1307 | 102.328 | -2.385 | - | 1.0 | -70.7 | | |
| 1331 | r 90- 5-23 | 1308 | 102.329 | -2.385 | - | 1.0 | -71.2 | | |

gravimeter : d86 factor : 1.000000 drift : 0.000

s : 6 code : 0 dof : 16.5 si : 1.26
 const : 113.508

| station | time | (GMT) | reading | height | volt | p | v | f | tide |
|---------|------------|-------|----------|--------|--------|--------|--------|---|------|
| c | [y.m.d] | [h.m] | [ins.un] | [m] | [volt] | (v/si) | [mgal] | | |
| 1331 | r 90- 5-23 | 819 | 98.371 | -2.421 | - | 1.0 | -44.0 | | |
| 1331 | r 90- 5-23 | 823 | 98.362 | -2.417 | - | 1.0 | -37.7 | | |
| 1331 | r 90- 5-23 | 909 | 98.355 | -2.411 | - | 1.0 | -60.3 | | |
| 1331 | r 90- 5-23 | 910 | 98.348 | -2.411 | - | 1.0 | -52.7 | | |
| 1331 | r 90- 5-23 | 914 | 98.340 | -2.411 | - | 1.0 | -45.4 | | |
| 1331 | r 90- 5-23 | 916 | 98.332 | -2.411 | - | 1.0 | -37.0 | | |

| | | | | | | | | | |
|--------|---|-----|------|------|---------|--------|---|-----|------------------|
| 1241.5 | r | 90- | 5-23 | 944 | 108.245 | 2.855 | - | 1.0 | 54.7 |
| 1241.5 | r | 90- | 5-23 | 946 | 108.233 | 2.855 | - | 1.0 | 68.1 |
| 1241.5 | | 90- | 5-23 | 948 | 108.292 | 2.855 | - | 1.0 | -1.0 -0.1 0.147 |
| 1241.5 | | 90- | 5-23 | 949 | 108.289 | 2.855 | - | 1.0 | 2.2 0.2 0.148 |
| 1331 | | 90- | 5-23 | 1020 | 98.283 | -2.398 | - | 1.0 | -2.2 -0.2 0.153 |
| 1331 | | 90- | 5-23 | 1021 | 98.274 | -2.398 | - | 1.0 | 8.1 0.6 0.153 |
| 1331 | | 90- | 5-23 | 1024 | 98.270 | -2.398 | - | 1.0 | 12.6 0.9 0.153 |
| 1331 | | 90- | 5-23 | 1025 | 98.272 | -2.398 | - | 1.0 | 10.2 0.8 0.153 |
| 1331 | | 90- | 5-23 | 1203 | 98.313 | -2.388 | - | 1.0 | -14.2 -1.0 0.127 |
| 1331 | | 90- | 5-23 | 1204 | 98.310 | -2.388 | - | 1.0 | -10.1 -0.7 0.127 |
| 1331 | | 90- | 5-23 | 1206 | 98.316 | -2.388 | - | 1.0 | -15.9 -1.2 0.125 |
| 1331 | | 90- | 5-23 | 1207 | 98.303 | -2.388 | - | 1.0 | -0.3 0.0 0.125 |
| 1241.5 | | 90- | 5-23 | 1230 | 108.352 | 2.829 | - | 1.0 | -25.7 -1.9 0.110 |
| 1241.5 | | 90- | 5-23 | 1231 | 108.351 | 2.829 | - | 1.0 | -23.9 -1.8 0.110 |
| 1241.5 | | 90- | 5-23 | 1233 | 108.349 | 2.829 | - | 1.0 | -20.2 -1.5 0.108 |
| 1241.5 | | 90- | 5-23 | 1235 | 108.347 | 2.829 | - | 1.0 | -16.4 -1.2 0.107 |
| 1331 | | 90- | 5-23 | 1300 | 98.314 | -2.385 | - | 1.0 | 22.7 1.7 0.088 |
| 1331 | | 90- | 5-23 | 1301 | 98.316 | -2.385 | - | 1.0 | 21.2 1.6 0.087 |
| 1331 | | 90- | 5-23 | 1302 | 98.314 | -2.385 | - | 1.0 | 24.3 1.8 0.087 |
| 1331 | | 90- | 5-23 | 1303 | 98.311 | -2.385 | - | 1.0 | 28.6 2.1 0.086 |

gravimeter : d86 factor : 1.000000 drift : 0.000

s : 7 code : 0 dof : 10.5 si : 0.75
const : 113.967

| station | time | (GMT) | reading | height | volt | p | v | f | tide |
|---------|----------|-------|----------|--------|--------|--------|--------|------|-------|
| c | [y.m.d] | [h.m] | [ins.un] | [m] | [volt] | (v/si) | [mgal] | | |
| 1331 | 90- 6- 7 | 827 | 98.758 | -2.414 | - | 1.0 | -16.9 | -1.3 | 0.081 |
| 1331 | 90- 6- 7 | 830 | 98.743 | -2.414 | - | 1.0 | -1.2 | -0.1 | 0.083 |
| 1331 | 90- 6- 7 | 833 | 98.738 | -2.414 | - | 1.0 | 2.9 | 0.2 | 0.084 |
| 1331 | 90- 6- 7 | 834 | 98.736 | -2.414 | - | 1.0 | 4.6 | 0.4 | 0.085 |
| 1241.6 | 90- 6- 7 | 854 | 108.748 | 2.865 | - | 1.0 | -16.0 | -1.3 | 0.096 |
| 1241.6 | 90- 6- 7 | 857 | 108.740 | 2.865 | - | 1.0 | -8.2 | -0.6 | 0.097 |
| 1241.6 | 90- 6- 7 | 859 | 108.734 | 2.865 | - | 1.0 | -2.2 | -0.2 | 0.098 |
| 1241.6 | 90- 6- 7 | 900 | 108.729 | 2.865 | - | 1.0 | 3.1 | 0.2 | 0.099 |
| 1331 | 90- 6- 7 | 920 | 98.722 | -2.408 | - | 1.0 | -3.5 | -0.3 | 0.107 |
| 1331 | 90- 6- 7 | 922 | 98.710 | -2.408 | - | 1.0 | 9.6 | 0.7 | 0.108 |
| 1331 | 90- 6- 7 | 924 | 98.706 | -2.408 | - | 1.0 | 13.5 | 1.0 | 0.109 |
| 1331 | 90- 6- 7 | 925 | 98.704 | -2.404 | - | 1.0 | 14.2 | 1.1 | 0.109 |

gravimeter : d86 factor : 1.000000 drift : 0.000

s : 8 code : 0 dof : 6.6 si : 0.37
const : 114.021

| station | time | (GMT) | reading | height | volt | p | v | f | tide |
|---------|----------|-------|----------|--------|--------|--------|--------|------|-------|
| c | [y.m.d] | [h.m] | [ins.un] | [m] | [volt] | (v/si) | [mgal] | | |
| 1241.6 | 90- 6- 7 | 943 | 108.775 | 2.855 | - | 1.0 | -10.8 | -0.8 | 0.116 |
| 1241.6 | 90- 6- 7 | 944 | 108.766 | 2.855 | - | 1.0 | -0.7 | -0.1 | 0.116 |
| 1241.6 | 90- 6- 7 | 947 | 108.762 | 2.855 | - | 1.0 | 3.1 | 0.2 | 0.117 |
| 1241.6 | 90- 6- 7 | 949 | 108.760 | 2.852 | - | 1.0 | 5.7 | 0.4 | 0.118 |
| 1331 | 90- 6- 7 | 1007 | 98.752 | -2.401 | - | 1.0 | -1.4 | -0.1 | 0.122 |
| 1331 | 90- 6- 7 | 1009 | 98.750 | -2.401 | - | 1.0 | 0.5 | 0.0 | 0.122 |
| 1331 | 90- 6- 7 | 1011 | 98.750 | -2.401 | - | 1.0 | 0.1 | 0.0 | 0.123 |
| 1331 | 90- 6- 7 | 1012 | 98.747 | -2.401 | - | 1.0 | 3.5 | 0.3 | 0.123 |

gravimeter : e839 factor : 1.000000 drift : 0.000

s : 9 code : 0 dof : 3.9 si : 1.76
const : 3902.436

| station | time | (GMT) | reading | height | volt | p | v | f | tide |
|---------|---------|-------|----------|--------|--------|--------|--------|---|------|
| c | [y.m.d] | [h.m] | [ins.un] | [m] | [volt] | (v/si) | [mgal] | | |

| | | | | | | | | | |
|--------|----------|------|----------|--------|--------|-----|-------|------|-------|
| 1331 | 90- 6- 7 | 822 | 3832.430 | -2.414 | 3.574 | 1.0 | 1.8 | 0.1 | 0.078 |
| 1241.6 | 90- 6- 7 | 850 | 3832.430 | 2.865 | -7.759 | 1.0 | 54.1 | 3.2 | 0.094 |
| 1331 | 90- 6- 7 | 917 | 3832.430 | -2.408 | 3.565 | 1.0 | -37.5 | -2.2 | 0.106 |
| 1241.6 | 90- 6- 7 | 940 | 3832.430 | 2.855 | -7.798 | 1.0 | -3.8 | -0.2 | 0.115 |
| 1331 | 90- 6- 7 | 1002 | 3832.430 | -2.401 | 3.604 | 1.0 | -14.6 | -0.8 | 0.121 |

gravimeter : g514 factor : 0.999100 drift : 0.000

s : 10 code : 0 dof : 7.7 si : 0.64
 const : 3852.353

| station | time | (GMT) | reading | height | volt | p | v | f | tide |
|---------|------------|-------|----------|--------|--------|--------|--------|------|-------|
| c | [y.m.d] | [h.m] | [ins.un] | [m] | [volt] | (v/si) | [mgal] | | |
| 1331 | 94- 5- 6 | 830 | 3793.667 | -1.180 | - | 1.0 | -15.0 | -0.8 | 0.043 |
| 1331 | 94- 5- 6 | 832 | 3793.643 | -1.180 | - | 1.0 | 9.0 | 0.5 | 0.043 |
| 1331 | 94- 5- 6 | 833 | 3793.661 | -1.180 | - | 1.0 | -9.5 | -0.5 | 0.044 |
| 1331 | 94- 5- 6 | 835 | 3793.649 | -1.180 | - | 1.0 | 2.4 | 0.1 | 0.044 |
| 1241.7 | 94- 5- 6 | 910 | 3805.886 | 1.358 | - | 1.0 | 5.2 | 0.3 | 0.048 |
| 1241.7 | 94- 5- 6 | 913 | 3805.867 | 1.358 | - | 1.0 | 24.4 | 1.4 | 0.048 |
| 1241.7 | r 94- 5- 6 | 917 | 3805.830 | 1.358 | - | 1.0 | 61.9 | | |
| 1241.7 | r 94- 5- 6 | 921 | 3805.831 | 1.358 | - | 1.0 | 60.9 | | |
| 1241.7 | r 94- 5- 6 | 922 | 3805.826 | 1.358 | - | 1.0 | 66.0 | | |
| 1331 | 94- 5- 6 | 957 | 3793.659 | -1.160 | - | 1.0 | -15.6 | -0.8 | 0.046 |
| 1331 | 94- 5- 6 | 959 | 3793.640 | -1.160 | - | 1.0 | 4.0 | 0.2 | 0.045 |
| 1331 | 94- 5- 6 | 1000 | 3793.649 | -1.160 | - | 1.0 | -5.0 | -0.3 | 0.045 |

gravimeter : e839 factor : 1.000000 drift : 0.000

s : 11 code : 0 dof : 13.3 si : 0.62
 const : 3909.722

| station | time | (GMT) | reading | height | volt | p | v | f | tide |
|---------|------------|-------|----------|--------|--------|--------|--------|------|--------|
| c | [y.m.d] | [h.m] | [ins.un] | [m] | [volt] | (v/si) | [mgal] | | |
| 1331 | 94- 5- 6 | 842 | 3841.000 | -1.180 | 5.338 | 1.0 | -0.7 | 0.0 | 0.045 |
| 1331 | 94- 5- 6 | 846 | 3841.000 | -1.176 | 5.342 | 1.0 | 1.6 | 0.1 | 0.046 |
| 1241.7 | 94- 5- 6 | 928 | 3841.000 | 1.355 | -6.907 | 1.0 | -19.9 | -1.1 | 0.048 |
| 1241.7 | 94- 5- 6 | 930 | 3841.000 | 1.355 | -6.901 | 1.0 | -13.8 | -0.7 | 0.048 |
| 1241.7 | 94- 5- 6 | 933 | 3850.000 | 1.355 | 2.136 | 1.0 | 16.7 | 0.9 | 0.048 |
| 1241.7 | 94- 5- 6 | 936 | 3841.000 | 1.355 | -6.886 | 1.0 | 1.8 | 0.1 | 0.047 |
| 1331 | 94- 5- 6 | 1008 | 3841.000 | -1.157 | 5.357 | 1.0 | 12.7 | 0.7 | 0.044 |
| 1331 | 94- 5- 6 | 1010 | 3841.000 | -1.157 | 5.359 | 1.0 | 15.0 | 0.8 | 0.044 |
| 1331 | r 94- 5- 6 | 1140 | 3841.000 | -1.141 | 5.408 | 1.0 | 86.5 | | |
| 1331 | r 94- 5- 6 | 1142 | 3841.000 | -1.137 | 5.408 | 1.0 | 86.0 | | |
| 1241.7 | r 94- 5- 6 | 1215 | 3841.000 | 1.312 | -6.916 | 1.0 | 29.0 | | |
| 1241.7 | r 94- 5- 6 | 1219 | 3841.000 | 1.312 | -6.907 | 1.0 | 39.9 | | |
| 1241.7 | 94- 5- 6 | 1225 | 3850.000 | 1.312 | 2.073 | 1.0 | 14.7 | 0.8 | -0.001 |
| 1241.7 | 94- 5- 6 | 1231 | 3841.000 | 1.309 | -6.961 | 1.0 | -9.1 | -0.5 | -0.004 |
| 1241.7 | 94- 5- 6 | 1234 | 3850.000 | 1.309 | 2.060 | 1.0 | 6.2 | 0.3 | -0.005 |
| 1241.7 | 94- 5- 6 | 1237 | 3841.000 | 1.309 | -6.970 | 1.0 | -15.7 | -0.9 | -0.006 |
| 1241.7 | 94- 5- 6 | 1241 | 3840.995 | 1.306 | -6.970 | 1.0 | -8.0 | -0.4 | -0.008 |
| 1331 | 94- 5- 6 | 1300 | 3840.995 | -1.121 | 5.292 | 1.0 | 0.5 | 0.0 | -0.016 |
| 1331 | 94- 5- 6 | 1304 | 3840.995 | -1.121 | 5.288 | 1.0 | -1.9 | -0.1 | -0.018 |

gravimeter : g514 factor : 0.999100 drift : 0.000

s : 12 code : 0 dof : 4.5 si : 1.30
 const : 3852.523

| station | time | (GMT) | reading | height | volt | p | v | f | tide |
|---------|------------|-------|----------|--------|--------|--------|--------|---|------|
| c | [y.m.d] | [h.m] | [ins.un] | [m] | [volt] | (v/si) | [mgal] | | |
| 1331 | r 94- 6- 2 | 846 | 3793.881 | -1.458 | - | 1.0 | 47.2 | | |
| 1331 | r 94- 6- 2 | 851 | 3793.890 | -1.458 | - | 1.0 | 38.6 | | |

| | | | | | | | | | | |
|--------|---|----------|------|----------|--------|---|-----|-------|------|-------|
| 1331 | r | 94- 6- 2 | 853 | 3793.880 | -1.458 | - | 1.0 | 49.1 | | |
| 1241.8 | | 94- 6- 2 | 936 | 3806.002 | 1.685 | - | 1.0 | 18.7 | 1.1 | 0.011 |
| 1241.8 | | 94- 6- 2 | 937 | 3806.009 | 1.685 | - | 1.0 | 11.8 | 0.7 | 0.011 |
| 1241.8 | | 94- 6- 2 | 939 | 3805.991 | 1.685 | - | 1.0 | 30.4 | 1.7 | 0.011 |
| 1331 | | 94- 6- 2 | 1007 | 3793.962 | -1.455 | - | 1.0 | -23.3 | -1.3 | 0.006 |
| 1331 | | 94- 6- 2 | 1010 | 3793.943 | -1.455 | - | 1.0 | -3.4 | -0.2 | 0.005 |
| 1331 | | 94- 6- 2 | 1013 | 3793.973 | -1.452 | - | 1.0 | -34.2 | -1.9 | 0.004 |
| 1331 | r | 94- 6- 2 | 1015 | 3793.921 | -1.452 | - | 1.0 | 19.0 | | |
| 1331 | r | 94- 6- 2 | 1016 | 3793.920 | -1.452 | - | 1.0 | 20.3 | | |
| 1331 | r | 94- 6- 2 | 1017 | 3793.920 | -1.452 | - | 1.0 | 20.4 | | |

gravimeter : g839 factor : 1.000000 drift : 0.000

s : 13 code : 0 dof : 5.5 si : 1.08
const : 3913.493

| station | time | (GMT) | reading | height | volt | p | v | f | tide | |
|---------|---------|----------|----------|----------|--------|--------|--------|-------|------|-------|
| c | [y.m.d] | [h.m] | [ins.un] | [m] | [volt] | (v/si) | [mgal] | | | |
| 1331 | r | 94- 6- 2 | 914 | 3839.398 | -1.458 | - | 1.0 | 81.5 | | |
| 1331 | r | 94- 6- 2 | 916 | 3839.392 | -1.458 | - | 1.0 | 87.9 | | |
| 1241.8 | | 94- 6- 2 | 945 | 3851.572 | 1.682 | - | 1.0 | -27.7 | -1.6 | 0.010 |
| 1241.8 | | 94- 6- 2 | 947 | 3851.560 | 1.682 | - | 1.0 | -15.1 | -0.9 | 0.009 |
| 1241.8 | | 94- 6- 2 | 949 | 3851.562 | 1.682 | - | 1.0 | -16.8 | -1.0 | 0.009 |
| 1331 | | 94- 6- 2 | 1027 | 3839.488 | -1.452 | - | 1.0 | 0.9 | 0.1 | 0.002 |
| 1331 | | 94- 6- 2 | 1029 | 3839.471 | -1.452 | - | 1.0 | 18.6 | 1.0 | 0.001 |
| 1331 | | 94- 6- 2 | 1030 | 3839.461 | -1.452 | - | 1.0 | 29.0 | 1.6 | 0.001 |
| 1331 | | 94- 6- 2 | 1032 | 3839.479 | -1.452 | - | 1.0 | 11.1 | 0.6 | 0.001 |

Anhang E : Messungen zum geodätischen Einmessen der Gravimeterstationen

Messungen vom 25.5.1989, Theodolit Kern E2, Distanzmessgerät DM 501

| Stat | Ziel | 1.Lage | 2.Lage | Mittel | Distanz Messband | DM 501 | Wasser |
|------|-------------------|-----------|----------|----------|---------------------|--------|---------|
| 111 | 113 | 273.3246 | 73.3263 | 273.3254 | | | |
| | 109 | 97.7808 | 297.7841 | 97.7824 | | | 1308.64 |
| | I | 169.9596 | 369.9691 | 169.9644 | 2.499 | 2.498 | |
| | II | 170.8299 | 370.8367 | 170.8333 | 2.333 | 2.329 | |
| | III _{hi} | 167.6210 | 367.6256 | 167.6233 | 2.382 | 2.384 | |
| | III _{vo} | 167.0549 | 367.0553 | 167.0551 | 2.348 | 2.352 | 1308.72 |
| 111 | 113 | 273.3261 | 73.3269 | 273.3265 | | | |
| | 109 | 97.7826 | 297.7834 | 97.7830 | | | |
| | I | 169.9662 | 369.9653 | 169.9658 | | | |
| | II | 170.8393 | 370.8376 | 170.8385 | | | |
| | III _{hi} | 167.6260 | 367.6276 | 167.6268 | | | |
| | III _{vo} | 167.0568 | 367.0551 | 167.0560 | | | |
| 511 | 513 | 0.0301 | 200.0312 | 0.0307 | | | |
| | 515 | 0.0160 | 200.0169 | 0.0165 | | | |
| | 509 | 220.2209 | 20.2211 | 220.2210 | | | |
| | 507 | 2220.2850 | 20.2857 | 220.2854 | | | |
| | I | 312.7152 | 112.7143 | 312.7148 | 3.286 | 3.284 | |
| | II | 309.8623 | 109.8596 | 309.8610 | 3.359 | 3.356 | |
| | III _{li} | 311.4592 | 111.4604 | 311.4598 | 3.452 | 3.456 | |
| | III _{re} | 312.1393 | 112.1401 | 312.1397 | 3.439 | 3.437 | |

Punktkoordinaten

| | Lokales System y [m] | x [m] | z [m] | Landeskoordinaten y [m] | x[m] | h |
|---------------------|-------------------------|--------|--------|----------------------------|------------|----------|
| Station 1241 | | | | | | |
| I | 499.961 | 46.687 | 39.404 | 748732.146 | 197594.282 | 1239.404 |
| II | 500.033 | 46.531 | | 748731.988 | 197594.215 | 1239.404 |
| III _{hi} | 499.904 | 46.554 | | 748732.014 | 197594.343 | 1239.404 |

| | | | | | | |
|---------------------|---------|--------|---------|------------|------------|----------|
| III _{vo} | 499.893 | 46.517 | | 748731.978 | 197594.355 | 1239.404 |
| | | | | | | |
| Okular | 499.502 | 46.633 | | 748732.092 | 197594.299 | 1239.503 |
| | | | | | | |
| Station 1331 | | | | | | |
| I | 500.545 | 53.689 | 129.421 | 748739.126 | 197593.494 | 1329.421 |
| II | 500.398 | 53.763 | | 748739.205 | 197593.639 | 1329.421 |
| III _{li} | 500.484 | 53.862 | | 748739.301 | 197593.550 | 1329.421 |
| III _{re} | 500.520 | 53.842 | | 748739.280 | 197593.514 | 1329.421 |
| | | | | | | |
| Okular | 500.533 | 53.747 | | 748739.184 | 197593.505 | 1329.520 |