

---

## AEROGRAVIMETRISCHE UNTERSUCHUNGEN IN DEN SCHWEIZER ALPEN

E.E. Klingelé, H.-G. Kahle

ETH Zürich

---

### Einleitung und Zielsetzung

Die bisherigen gravimetrischen Arbeiten in der Schweiz beruhen fast ausschliesslich auf terrestrischen Anwendungen. In diesem Bereich wird seit Jahren intensive Forschung betrieben: So wurde zum Beispiel eine Karte der Bouguer-Anomalien der Schweiz publiziert [KLINGELE und OLIVIER, 1978, 1980] und die Auswertung der Schweredaten entlang der EGT (European Geotraverse) vom Nordkap bis zur tunesisch-libyschen Grenze [KLINGELE, et al., 1990] durchgeführt. Im Bereich der terrestrisch- gravimetrischen Messtechnik hat unsere Gruppe in Zusammenarbeit mit dem "Istituto G. Colonetti" (Turin) und dem "Istituto de Miniere e Geofisica Applicata" (Triest) ein absolutes Schwerenetz in der Schweiz erstellt, bestehend aus sieben Stationen, die mit Hilfe interferometrischer Methoden gemessen wurden [KAHLE, H.-G., et al., 1981]. Zwei dieser Stationen bilden eine hochpräzise gravimetrische Eichstrecke, die zur Kalibration von Gravimetern geeignet ist und schon von mehreren Firmen benutzt wurde. Im Rahmen der systematischen Detailaufnahme der Schweiz wurden bis heute bereits 12'000 relative Schweremessungen (circa 4000 km<sup>2</sup>) durchgeführt. Die Daten der Schwerekarte der Schweiz (Bouguer-Anomalien) wurden auch für die Berechnung der isostatischen Anomalien benutzt [KLINGELE, 1979].

Im hier präsentierten Projekt sollen Methoden zur Realisierung von flugzeuggestützten Gravitationsfeld-Messungen (Aerogravimetrie) in Kombination mit neuen Techniken der Präzisionsnavigation entwickelt werden. Dabei sind zwei Hauptprobleme zu bearbeiten:

- 1) Einsatz von Gravitationsfeld-Sensoren im hochdynamischen Modus
- 2) Bestimmung der Störbeschleunigungen des Flugzeuges mit Hilfe der Satellitengeodäsie

Um den Bedürfnissen der Geodäsie und Geophysik gerecht zu werden, bedarf es einer Gravitationssignalauflösung von mindestens  $\pm 10^{-5} \text{ ms}^{-2}$  ( $10^{-6} \text{ g}$ ). Die

Störbeschleunigungen des Flugzeuges sind dagegen um 10er Potenzen grösser als die zu detektierenden Schwereanomalien. Die Extraktion des Gravitationssignals aus den Flugzeugmessungen ist daher von besonderer Schwierigkeit. Unser Konzept zielt auf die Nutzbarmachung von kinematisch erhobenen Ortungen des Gravitationssensors mit Hilfe des U.S. Satellitensystems NAVSTAR/GPS, aus dem man im Prinzip gravitationsfeldfreie Störbeschleunigungen bestimmen kann.

Eine erfolgreiche Lösung würde die Methode zu einem begehrten Hilfsmittel für die Landesaufnahmen machen. Um Kenntnis über das dreidimensionale Gravitationsfeld in unserem Land zu erhalten, werden die Messungen in der gesamten Schweiz ausgeführt. Dabei wird vor allem auch der Einfluss der Alpen und der geologischen Tiefenstrukturen studiert.

### **Messparameter**

Vor Beginn der Flüge wurden die Messparameter auf Grund der vorgegebenen Satellitenverfügbarkeit, der Messbedingungen und der Zivilluftfahrtsicherheit bestimmt. Folgende Werte wurden adaptiert:

Flugrichtung	76°
Flughöhe	5000 m
Fluggeschwindigkeit	240 km/h
Flugzeit	23 <sup>59</sup> bis 05 <sup>00</sup>
Abtastraten:	
GPS	0.5 sec
Gravimeter	1.0 sec
Horiz. Beschleunigungsmesser	1.0 sec
Cross-Coupling	1.0 sec

### **Messinstrumente**

Die Flüge wurden mit einer Twin Otter de Havilland HB-LID der Eidgenössischen Vermessungsdirektion durchgeführt. An Bord der Maschine kamen folgende Geräte zum Einsatz:

- 1 Gravimeter LCR SEASYS S114
- 1 Kreiselstabilisierte Plattform LCR SEASYS S 114
- 1 Intel 386SX (Plattformsteuerung)

- 1 Mac Intosh II SX (Gravimetersteuerung)
- 1 Compaq 316 SL (Cross Coupling-Registrierung)
- 1 GPS-Empfänger Trimble Geodesist 4000 SST (L1 + L2)
- 1 GPS-Empfänger Trimble Aerial 4000 ST (L1)
- 1 "Attitude Gyro", 251 ECFR, mit Analogausgang (+10V)
- 2 Notebook Compaq LTE 386/25
- 1 GPS/LORAN-Empfänger 2000

Zusätzlich wurden am Boden als Referenzempfänger

- 2 GPS-Empfänger Trimble Surveyor II (L1 + L2)
- 1 GPS-Empfänger Trimble Geodesist 4000 SST (L1 + L2)

betrieben.

### **Durchgeführte Arbeiten**

In einer ersten Anfangsphase wurde das Aerogravimetrie-Softwarepaket entwickelt. Anschliessend wurde das Schiffs-Gravimetersystem an den flugzeuggestützten Messmodus hinsichtlich Grösse und Gewicht angepasst. Zudem war es nötig, eine volle Digitalsteuerung des Gravimeters und der kreiselstabilisierten Plattform zu entwickeln. Nach der Anpassung der Stromversorgung des Vermessungsflugzeuges und der Flugparameter-bestimmung konnten die ersten Testflüge auf ausgewählten Nordsüd - und Ostwestlinien in der Schweiz durchgeführt werden. Diese Testflüge ermöglichten es, Informationen über nötige Instrumentenänderungen und über die Anpassung der Instrumentenfixierung im Flugzeug zu gewinnen. Darüber hinaus wurde das Problem der Zeitsynchronisierung zwischen GPS- und den gravimetrischen Messungen gelöst. Vor der Durchführung der eigentlichen wissenschaftliche Flüge wurden umfangreiche Messungen der Vibration vorgenommen und die Antwortfunktion des Flugzeug-Plattform-Gravimeter-Systems darauf bestimmt.

### **Auswertung**

Die bisherigen vorläufigen Arbeiten betreffen vor allem die obengenannten Vibrationsmessungen, die gravimetrischen Auswertungen sowie die Extraktion der Flugzeugbeschleunigungen mit Hilfe von GPS [Brozema et al. 1989].

### Vibrationsmessungen

Für die Vibrationsmessungen wurden Micro-Beschleunigungsmesser an verschiedenen Stellen der Plattform und des Flugzeuges installiert, um die vertikalen und horizontalen Beschleunigungen während des Testfluges zu messen. Die Resultate haben gezeigt, dass die Vibrationen des Flugzeuges vertikale Beschleunigungen bis zu 0.75 g auf der Fixierungsschiene (Fig. 1a) produzieren. Das Dämpfungssystem reduziert diese vertikalen Beschleunigungen bis zu 20 milli-g [Bagnaschi et al. 1993] (Fig. 1b).

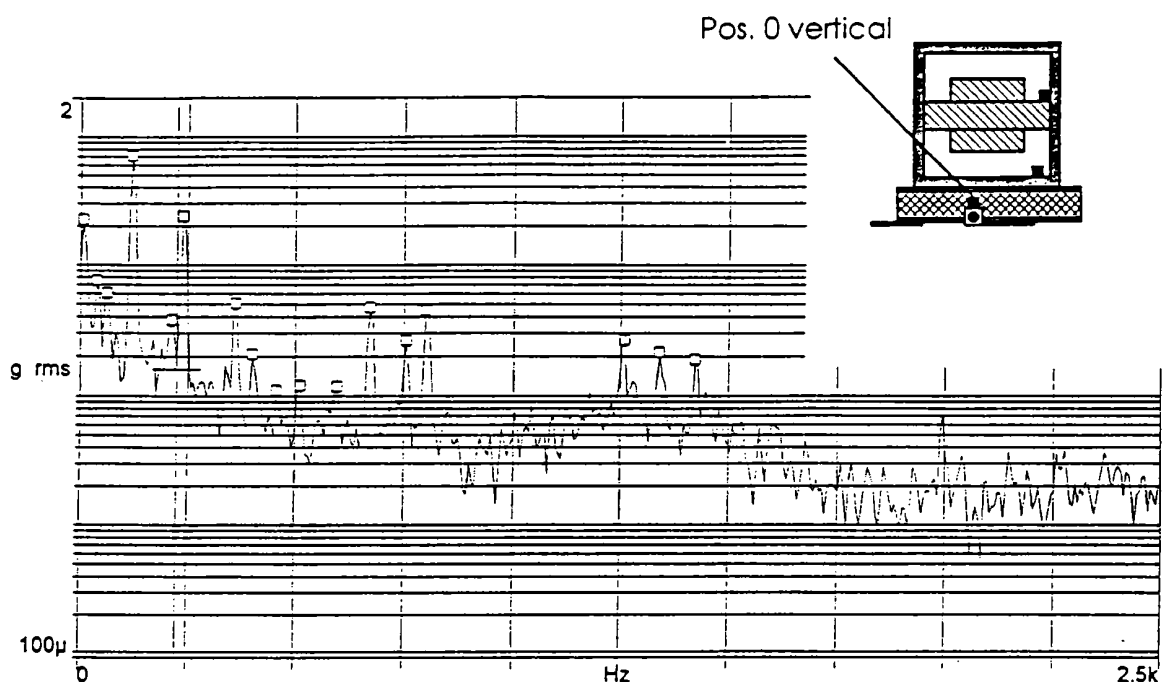


Fig. 1a: Vibrationsspektrum gemessen am Boden des Flugzeuges.

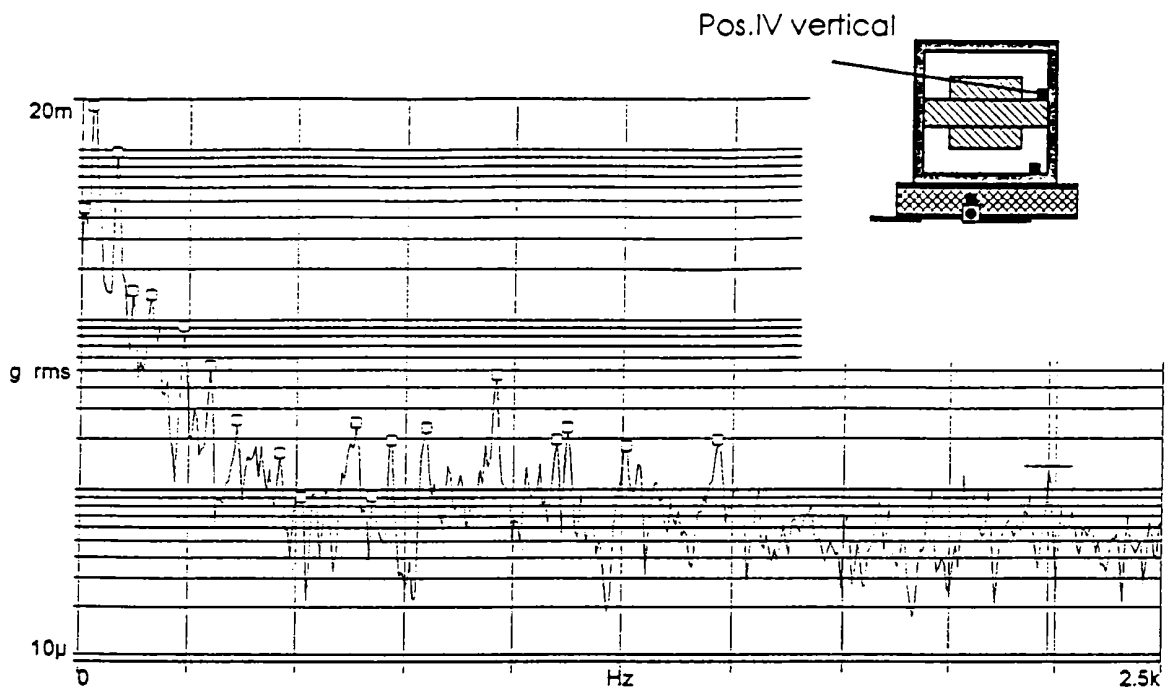


Fig. 1b: Vibrationsspektrum gemessen auf dem Plattformrahmen.

### Softwarepaket Aerogravimetrie

Das Softwarepaket kann in zwei Hauptteile untergliedert werden. Der erste Teil betrifft die Transformation vom unkorrigierten Messsignal des Gravimeters, durch Ableitung und Filterung der Balkenlage und - Geschwindigkeit sowie der Federungsspannung, auf die Schwerewerte [LaCoste, 1967, Brozema and Peters 1988, Valliant et al. 1985, Bell et al. 1991]. Nach Filterung der GPS-Positionen werden die vertikale und Eötvös-Beschleunigung sowie der Einfluss der Höhenänderung des Flugzeuges gerechnet. Im gleichen Schritt sind die "Cross-Coupling" Korrekturen integriert [LaCoste 1967, Harlan 1968].

Die Resultate dieses ersten Unterteils werden als Eingangsgrößen für den zweiten Teil benutzt. Daraus werden die Freiluft- und Bouguer- Anomalien gerechnet, mit einer gleichartigen Methode, wie bei der terrestrischen gravimetrischen Aufnahme.

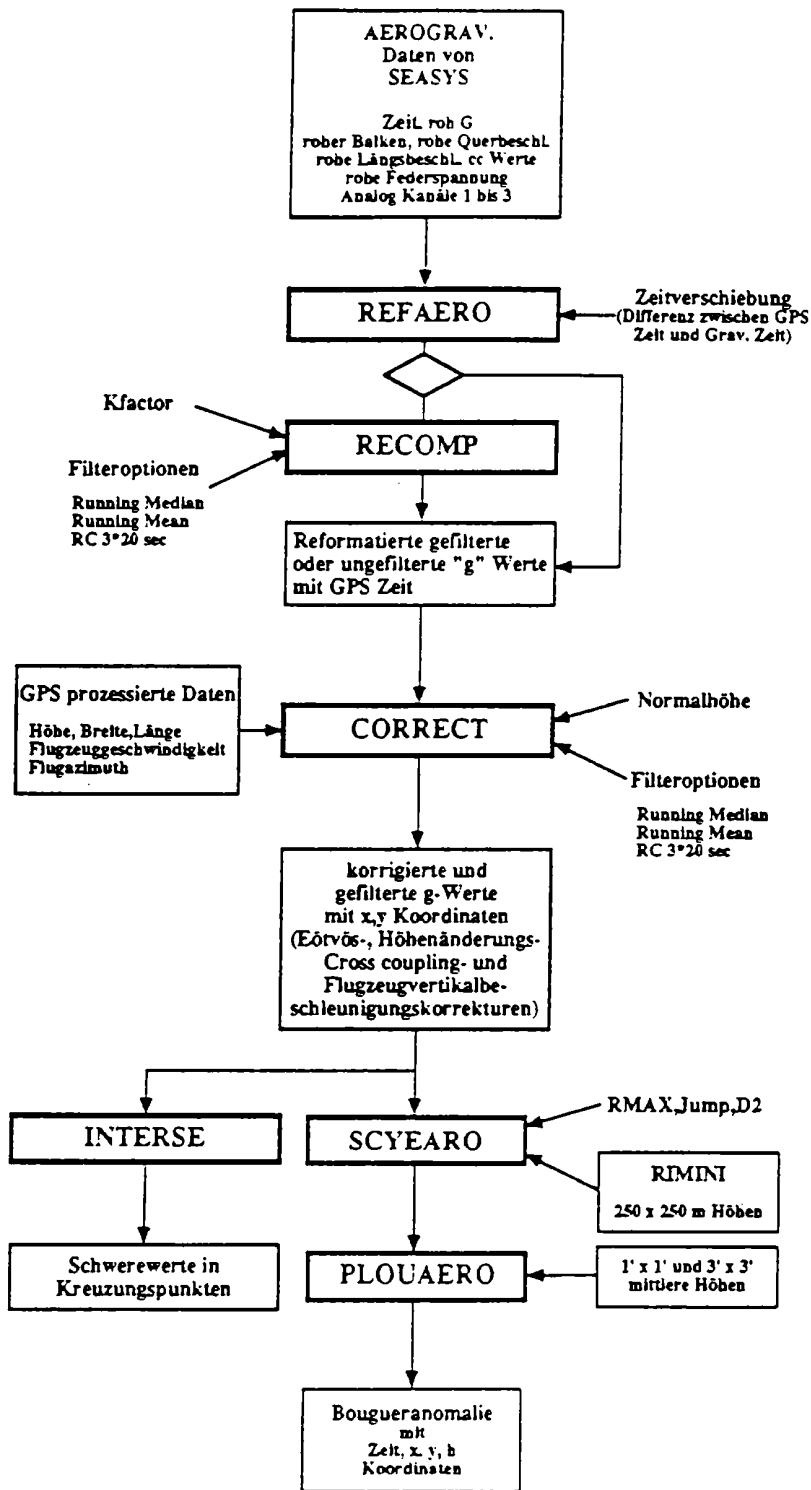


Fig. 2: Flussdiagramm des Softwarepaketes Aerogravimetrie

## GPS

Die Auswertung der GPS Messungen wurde mit dem Softwarepaket [COCARD, 1990, 1993; COCARD und GEIGER, 1990, 1992] durchgeführt.

### Erste Ergebnisse

Fig. 3 zeigt die im Dezember 1992 geflogene Fluglinien. Der mittlere Abstand der alpenparallelen Linien beträgt 12 km. Die dargestellten Linien sind aus den GPS-Daten berechnet worden.

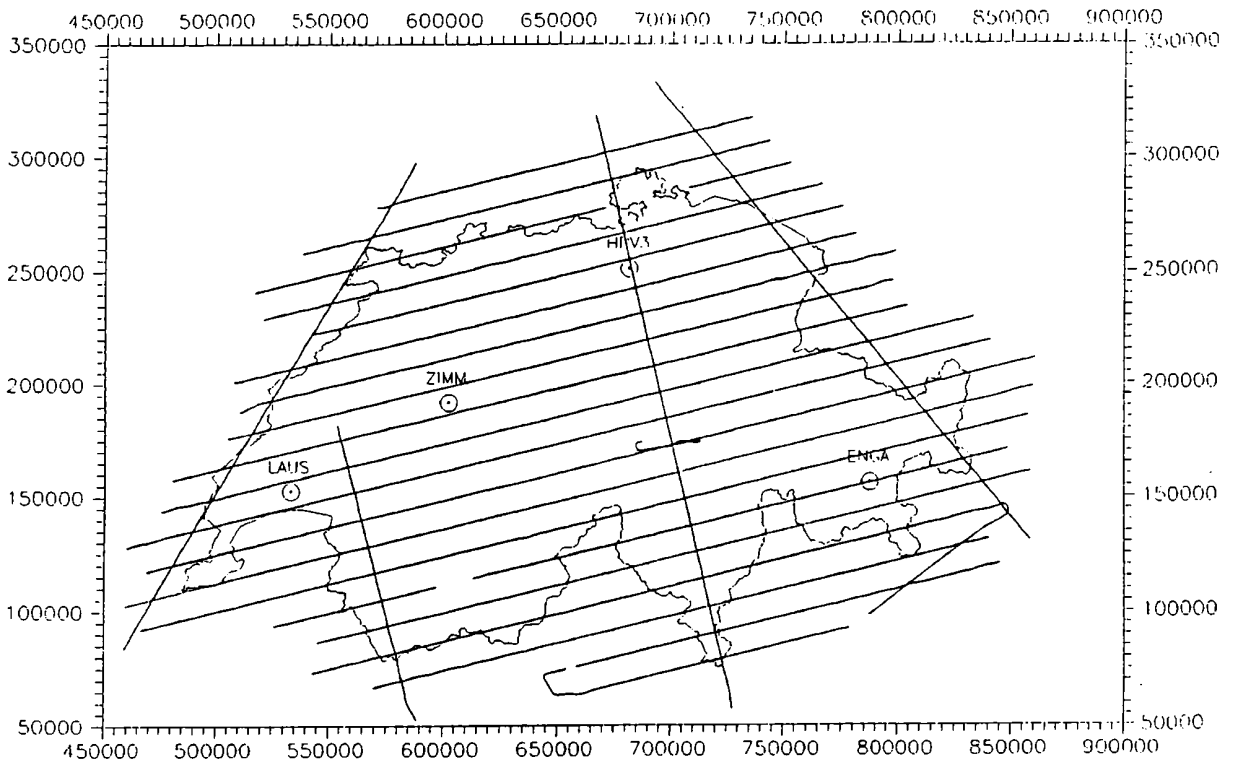


Fig. 3: Im Dezember 1992 geflogene Fluglinien

Fig. 4 enthält als Beispiel die vierte nördliche Linie, dargestellt in West-Ost Richtung. Die durchgezogene Kurve gibt die mit dem Gravimeter gemessene Beschleunigung wieder, während die gestrichelte Kurve vertikale Beschleunigungen des Flugzeuges angibt, die aus der kinematischen GPS- Positionierung erhalten wurden. Die Variationen der Eötvös-Beschleunigung (durchgezogene Linie) und der Höhenkorrekturen, bezogen auf eine Standardhöhe (gestrichelte Linie), sind im unteren Teil der Fig. 4 dargestellt.

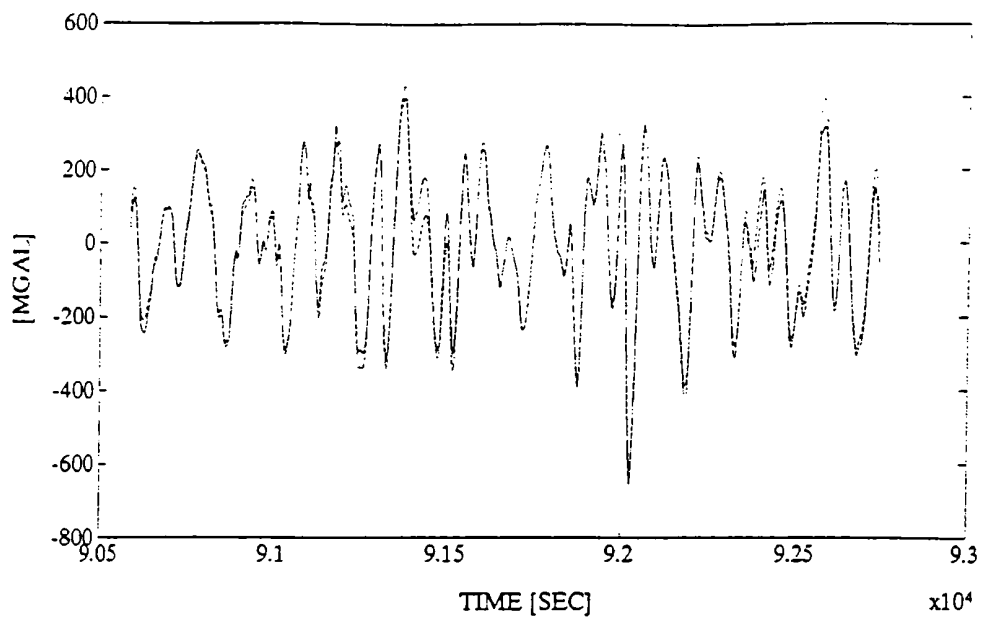


Fig. 4a: Die vierte nördliche geflogene Linie, dargestellt in West-Ost Richtung. Vertikale Beschleunigungen von Gravimeter (durchgezogene Linie) und GPS (gestrichelte Linie).

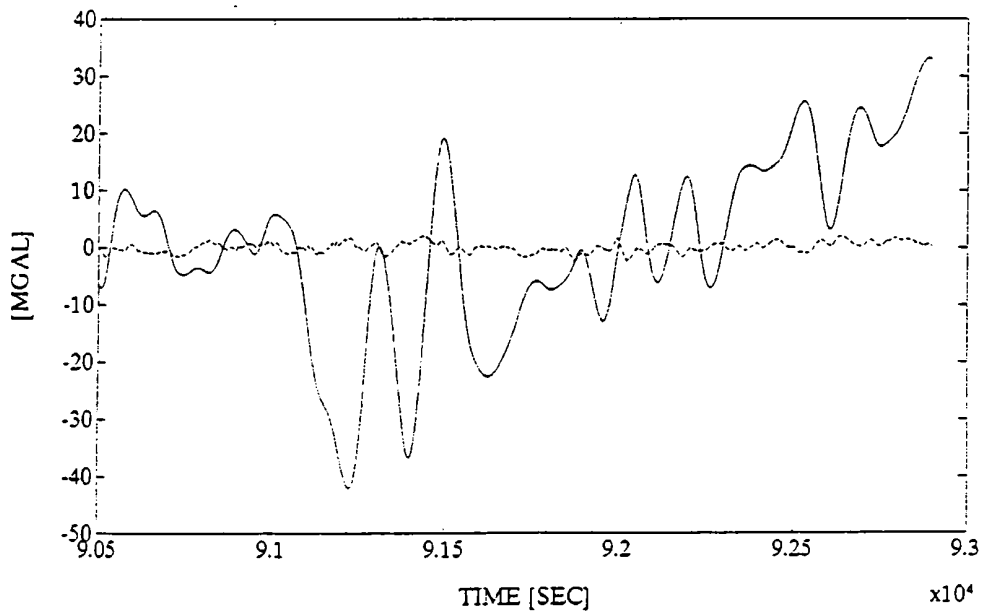


Fig. 4b: Die vierte nördliche geflogene Linie, dargestellt in West-Ost Richtung. Variationen der Eötvös-Beschleunigung (durchgezogene Linie) und der Höhenkorrekturen, bezogen auf eine Standardhöhe (gestrichelte Linie).



## **Ausblick und Dank**

Nach den ersten vorläufigen Auswertungen wird eine Verbesserung der Parameter der angewandten Filter für das Gravimetersystem, die kreiselstabilisierte Plattform sowie die GPS-Registrierungen vorgenommen werden. Besonderer Schwerpunkt wird dabei die Anwendung von Kalmanfiltern für die kinematische GPS-Positionierung sein.

An den bisher durchgeführten Arbeiten waren folgende Institutionen aktiv mitbeteiligt:

- Eidgenössische Vermessungsdirektion, Abteilung Vermessungsflugdienst
- Schweizerisches Bundesamt für Zivilluftfahrt, Sektion Nichtlinienverkehr und Multilaterale Beziehungen
- Schweizerisches Bundesamt für Militärflugwesen und Fliegerabwehr
- Firma LaCoste & Romberg Gravimeters Inc.
- Ingenieurgesellschaft für Geophysikalische Messtechnik m.b.H

Wir danken diesen Behörden und Firmen für ihre wertvollen Beiträge. Zu grossem Dank sind wir zudem der ETH-Zürich für die Finanzierung dieses Projektes verpflichtet. Insbesondere Prof. Dr. R. Hütter, Vizepräsident für Forschung an der ETH-Zürich, hat uns zudem in der Phase der organisatorischen Vorbereitung für die Durchführung der Flüge geholfen.

An den eigentlichen Flugmessungen haben folgende Mitarbeiter teilgenommen: F. Arnet, L. Bagnaschi, A. Baumberger, H. Escher, B. Gugger, M. Halliday, R. Hübscher, T. Wyss. Ohne ihren engagierten Einsatz hätte das Messprogramm nicht realisiert werden können.

## **Literatur**

Bagnaschi L., Klingelé E.E., White T. und St. Gatta (1993) : Vibration Analysis for Airborne Gravimetry, IGP-Bericht Nr. 221, 29 pp.

Bell R.E., Coakley B.J., und R.W. Stemp. 1991. Airborne gravimetry from a small twin engine aircraft over the Long Island Sound. Geophysics, Vol. 56, No 9., 1486-1493.

Brozema J.M., Mader G.L., und M.F. Peters, 1989. Interferometric Global Positioning System: Three Dimensional Positioning Source for Airborne Gravimetry. JGR, vol. 94, No B9, 12'153 - 12'162.

- Brozema J.M. und M.F. Peters (1988) : An airborne gravity study of eastern North Carolina. *Geophysics* 53, p 245-253.
- Cocard M. und A. Geiger (1990) : GPS en mode cinématique. Dans Cours sur la méthode GPS, 26-28 mars, EPFL, Lausanne 1990.
- Cocard M. (1990) : Kinematic Experiences with GPS and Laser Tracker. In : Cahiers du Centre Européen de Géodésie et de Séismologie, Volume 2 : GPS for Geodesy and Geodynamics, Luxembourg.
- Cocard M. und A. Geiger, 1992. Systematic Search for all possible Widelanés, in Proceedings of the 6th International Geodetic Symposium on Satellite Positioning. Columbus, Ohio (USA).
- Harlan R.B., 1968. Eötvös Corrections for Airborne Gravimetry. *JGR*, vol 73., No 14. 4675 - 4679
- Kahle H.-G., Geiger A., Cocard M., Wirth B., Bürki B., Marti U. und M.V. Müller (1991): Grundlagen und Anwendungen des neuen Satellitengestützten Navigationssystems NAVSTAR/GPS in der Geodäsie und der Geodynamik. *Wiss. Schlussbericht des ETH-Forschungsprojektes (Reg. Nr. 06714/41.0820.5). März 1991.*
- Kahle H.-G., Cagienard P., Müller St., Marson I. und F. Chaperon (1981): Absolute Schweremessungen in der Schweiz als Basis für geodynamische Untersuchungen zur aktuellen Alpendynamik. *Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik*: 221-228.
- Klingelé E.E. und R. Olivier (1978) : Carte gravimétrique de la Suisse -Anomalie de Bouguer 1/500'000e. Service Topographique Fédéral, Wabern.
- Klingelé E.E. und R. Olivier (1980) : La nouvelle carte gravimétrique de la Suisse. *Matériaux pour la géologie de la Suisse, Série Géophysique, No. 20. Kümmerly und Frei, Bern.*
- Klingelé E.E. (1979) : Carte gravimétrique de la Suisse-Anomalie Isostatique (Système d'Airy) 1/500'000 e Service Topographique Fédéral, Wabern.

Klingelé E.E, Lahmeyer B. und R. Freeman (1990) : EGT. Gravity Anomaly Maps.  
Bouguer Anomalies. European Sciences Fundation. (2 Maps).

LaCoste L. (1967) : Measurement of Gravity of Sea and in the Air. Rev. of Geophys.  
p 477-526.

Valliant H.D., Halpenny J. und R.V. Cooper (1985): A microprocessor-based controller  
and data acquisition system for LaCoste and Romberg air-sea gravity meters.  
Geophysics 50, p 840-845.

