

# Krustenbewegungen im Yellowstone National Park

Autor(en): **Arnet, F.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik : VPK =  
Mensuration, photogrammétrie, génie rural**

Band (Jahr): **93 (1995)**

Heft 4: **ETHZ : Departement Geodätische Wissenschaften = EPFZ :  
Département des sciences géodésiques**

PDF erstellt am: **10.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-235157>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# Krustenbewegungen im Yellowstone National Park

F. Arnet

Die Yellowstone Caldera im Nordwesten von Wyoming (USA) weist hohe Raten von Höhen- und Schwereänderungen auf. Höhenänderungen wurde mittels Präzisionsnivellement 1923 und alle paar Jahre seit 1975 festgestellt. Schweremessungen wurden erstmals 1977 durchgeführt und ab 1983 mit wenigen Ausnahmen jedes Jahr. Beide Messmethoden wurden dabei vor allem auf einer Linie, die im nördlichen Teil die Caldera durchquert, konzentriert. Die Messungen ergaben, dass sich die Caldera entlang dieser Linie von 1923 bis 1984 um bis zu 0,8 m gehoben hatte. Seither senkt sie sich wieder, bis 1993 um bis zu 14 cm. Die Schwerewerte entlang derselben Linie änderten sich von 1977 bis 1986 um bis zu  $-60 \pm 12 \mu\text{gal}$  ( $1 \mu\text{gal} = 10^{-8} \text{ m s}^{-2}$ ). Bis 1993 erhöhte sich die Schwere wieder um bis zu  $+65 \pm 12 \mu\text{gal}$ . Der Faktor zwischen Höhen- und Schwereänderungen ist ein Mass für die Grösse der Massenänderungen im Untergrund. Dieser variiert stark zwischen den einzelnen Jahren. Über längere Zeiträume nähert er sich dem Freiluftgradienten von  $-0,3 \text{ mgal/m}$  an, in denen keine Massenänderungen auftreten.

*Le système volcanique de la Caldera du Yellowstone, dans le nord-ouest du Wyoming (USA), se caractérise par d'importantes variations d'altitude et de pesanteur. Les variations d'altitude ont été constatées par un nivellement de précision, fait en 1923, et répété à plusieurs reprises à partir de 1975. Des mesures de pesanteur ont été exécutées pour la première fois en 1977 et, à quelques exceptions près, chaque année dès 1983. Les deux méthodes de mesure ont été concentrées notamment sur une ligne traversant la partie nord de la Caldera. Les mesures ont révélé que le long de cette ligne, la Caldera s'est élevée de 0,8 m entre 1923 et 1984. Depuis, elle s'est abaissée de 14 cm jusqu'en 1993. Les valeurs de gravitation le long de cette même ligne ont varié entre 1977 et 1986 jusqu'à  $-60 \pm 12 \mu\text{gal}$  ( $1 \mu\text{gal} = 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ ). Jusqu'en 1993, la pesanteur a de nouveau augmenté jusqu'à  $+65 \pm 12 \mu\text{gal}$ . Le facteur entre la variation de l'altitude et celle de la pesanteur est une mesure pour la grandeur de la variation de la masse dans le sous-sol. Ce facteur varie fortement d'une année à l'autre. Il s'approche, au cours de périodes plus longues, du gradient de l'air libre de  $-0,3 \text{ mgal/m}$  lors desquelles il n'y a pas de variations de masse.*

La Yellowstone Caldera a nordovest dello Wyoming (USA) presenta alti tassi di variazioni di altitudine e gravità. Nel 1923 si è realizzata una livellazione di precisione per registrare le variazioni di altitudine, che dal 1975 è stata ripetuta ogni paio d'anni. Le misurazioni della gravità sono state effettuate la prima volta nel 1977 e dal 1983 sono state ripetute, tranne qualche eccezione, ogni anno. Ambedue i metodi di misura sono stati concentrati specialmente su una linea che attraversa la Caldera nella parte settentrionale. Dalle misurazioni è risultato che dal 1923 fino al 1984 la Caldera, lungo questa linea, si era alzata fino a 0,8 m. Da allora fino al 1993 si è di nuovo abbassata di 14 cm. Dal 1977 fino al 1986 i valori gravitazionali hanno subito alterazioni fino a  $-60 \pm 12 \mu\text{gal}$  ( $1 \mu\text{gal} = 10^{-8} \text{ m s}^{-2}$ ). Fino al 1993 la gravità è aumentata di nuovo fino a  $+65 \pm 12 \mu\text{gal}$ . Il fattore tra le variazioni di altezza e gravità è una misura per verificare l'entità dei cambiamenti della massa nel sottosuolo. Questo varia notevolmente di anno in anno. In lunghi lassi di tempo si avvicina ai gradienti esterni di  $-0,3 \text{ mgal/m}$  in cui non si verifica nessuna modifica della massa.

## Einführung

Die Yellowstone Caldera liegt in der Mitte des Yellowstone National Parks im Nordwesten des Bundesstaates Wyoming, USA. (Abb. 1). Sie bildet ein aktives vulkanisches System mit sehr hohen Wärmeflusswerten ( $> 1500 \text{ mWm}^{-2}$ ), weit verbreiteter Erdbebenaktivität und grossen Beträgen von rezenten Krustenbewegungen. Die Yellowstone Caldera ist Teil eines Hot Spots, der ursprünglich unter der Snake

River Ebene lag und sich mit einer Geschwindigkeit von rund  $45 \text{ mm/a}$  in nordöstlicher Richtung bewegt. Die Überreste der letzten drei Eruptionen dieses Hot Spots sind immer noch sichtbar. Sie fanden vor 2 Mio., 1,2 Mio. und 0,6 Mio. Jahren statt und gehören zu den grössten natürlichen Ereignissen, die auf der Erde vorkommen. Das Volumen der Eruption vor 0,6 Mio. Jahren betrug rund  $1000 \text{ km}^3$ . 1923 wurde ein erstes Präzisionsnivellement über den ganzen Park durchgeführt.

Vollständige Wiederholungen des Netzes wurden von 1975 bis 1977 und 1987 ausgeführt. Jährliche Messungen entlang der speziell aktiven Linie über die Caldera von Canyon Junction nach Fishing Bridge (Abb. 2) wurden von 1983 bis 1993 vorgenommen. Um die zeitlichen Änderungen des Schwerfeldes zu beobachten, wurde 1977 ein Präzisionsschwerenetz mit über 200 Stationen, verteilt über den gesamten Yellowstone National Park eingerichtet. Die Stationen wurden auf bestehenden Nivellements punkten gewählt. In Tabelle 1 ist ersichtlich, wo und wann Wiederholungsmessungen durchgeführt wurden. Die Genauigkeit der gemittelten Schwerewerte betrug im Mittel  $\pm 12 \mu\text{gal}$  ( $1 \mu\text{gal} = 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ ). 1987 wurde ein GPS-Netz mit Punkten entlang den Nivellementslinien sowie auch in der nur schwer zugänglichen Wildnis realisiert. Dieses Netz wurde auch mit einem Netz im Gebiet des Hebgen Lake Erdbebens (1959, 7,5 auf der Richter Skala) im Südwesten Montanas verbunden. Wiederholungsmessungen dieses Netzes wurden 1989, 1991 und 1993 durchgeführt. Erste Ergebnisse zeigen, dass neben der Höhenänderung auch horizontale Bewegungen bis zu  $10 \text{ mm/a}$  aufgetreten sind.

## Yellowstone Präzisionsnivellement

Einer der besten Wege, um Höhenänderungen mit hoher Genauigkeit zu bestimmen, ist das Präzisionsnivellement. Damit kann eine Genauigkeit von  $\sqrt{D}$  mm erreicht werden, wobei D der nivellierten Distanz in Kilometern entspricht. Ein erstes Mal wurde der gesamte Yellowstone National Park 1923 nivelliert. Diese Messungen wurden 1934 und 1960 teilweise wiederholt. Von 1975 bis 1977 wurde dann wieder der gesamte Park nivelliert. Als Ergebnis wurden auf den Linien von Canyon Junction nach Fishing Bridge und von Madison Junction via Old Faithful nach West Thumb relative Höhenänderungen von bis zu  $+70 \text{ cm}$  gefunden. Von 1984 bis 1993 wurde die Linie von Canyon Junction via Fishing Bridge bis nach Sylvan Lake jährlich nachgemessen. Weitere Messungen sind nun alle zwei Jahre geplant. 1987 wurde zusätzlich das gesamte Netz und 1986 die Linie von Madison Junction nach West Thumb nivelliert. Die erhaltenen Resultate zeigen, dass sich die Punkthöhen entlang der nördlichen Calderalinie von 1976 bis 1984 vergrösserten ( $\Delta h < 120 \text{ mm}$ ), bis 1985 konstant blieben, und sich seither mit einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von  $15 \text{ mm}$  bis  $20 \text{ mm}$  pro Jahr, maximal im Jahr 1987 ( $-\frac{\Delta h}{a} > -40 \text{ mm}$ ), vermindern.

Die südliche Calderalinie von Madison Junction nach West Thumb zeigte von

	gesamter Nationalpark	Canyon Junction – Fishing Bridge – Sylvan Lake	Madison Junction – Old Faithful – West Thumb	Backcountry
Nivellement	1923, 1975–1977, 1987	1983, 1984, 1985, 1986, 1988, 1989, 1990, 1991, 1992, 1993	1986	
Schwere	1977, 1983, 1987, 1991, 1993	1977, 1986, 1988, 1989, 1990	1986, 1989	1984, 1989
GPS	1987, 1989, 1991, 1993			

Tab. 1: Geodätische Messungen im Yellowstone National Park.

1976 bis 1986 eine Höhenzunahme ( $\Delta h < 90$  mm) und eine Abnahme von 1986 bis 1987 ( $\Delta h > -20$  mm).

Die Höhenänderungen von 1976 bis 1987, den zwei letzten Nivellementskampagnen über den gesamten Yellowstone National Park, sind sehr ähnlich verglichen mit den Änderungen von 1923 bis 1976 (Abb. 2 und 3). Die gesamte Caldera erfährt eine positive Höhenänderung mit einer maximalen Rate von 10 mm/a in der Mitte des Hayden Valleys. Diese Rate ist jedoch nicht repräsentativ für die tatsächliche Geschwindigkeit, da die Messungen entlang der Linie von Canyon Junction nach Fishing Bridge belegen, dass sich diese Linie nur bis 1984 gehoben hat und seither wieder rückläufig ist. Leider sind keine Messung nordöstlich des Hayden Valleys vorhanden, da der Zugang für Präzisionsnivellements unmöglich ist. Trotzdem ist zu erwarten, dass auch dort beträchtliche Höhenänderungen auftreten. In dieser Gegend werden die GPS-Stationen, welche 1987 eingerichtet wurden, eine gute Hilfe sein, die Höhe zu überwachen.

Eine Frage ist, weshalb die Aufwärtsbewegung von 1976 bis 1984 zu einer negativen Höhenänderung wechselte. Zwei mögliche Erklärungen dafür sollen hier gegeben werden. Die erste ist, dass der Wechsel im Zusammenhang mit einem Erdbebenschwarm im Jahr 1983 mit zahlreichen Erdbeben der Magnitude 3.4 bis 4.5 im Nordwesten des Yellowstone National Parks steht. Die zweite wäre das Heppen Lake Erdbeben der Stärke 7.5 im Jahr 1959. Direkt mit diesem Erdbeben war eine Höhenänderung von 6 m unmittelbar nordwestlich der Parkgrenze verbunden. So wäre es möglich, dass ein Trend von negativer Höhenänderung seit 1923 von fluidmechanischen Effekten dieses Erdbebens in der geologisch schwachen Struktur der Yellowstone Caldera überlagert wurde.

Überhaupt scheint die Annahme, dass der Trend der Höhenänderung zwischen 1923 und 1976 konstant blieb, nicht sicher zu sein. Geologische Anzeichen am Ufer des Yellowstone Lakes lassen darauf schlies-

sen, dass das Vorzeichen der Änderung mehrere Male seit der letzten Eiszeit vor rund 10 000 Jahren wechselte. Demgegenüber steht die Änderungsrate von doch beachtlichen 13.5 mm/a von 1923 bis 1976, welche nur unwesentlich kleiner ist als der Betrag der momentanen Höhenänderung.

## Schwere

Das Yellowstone Präzisionsschwerenetz wurde auf ausgewählten Punkten des Nivellementnetzes errichtet und 1977 zum ersten Mal gemessen. Ursprünglich war geplant, dass die Schweremessungen die zeitintensiven und teuren Präzisionsnivellements ersetzen sollten. Dies wäre möglich unter der Annahme, dass Höhen-

aus Schwereänderungen via dem Freiluftgradienten ( $-0.3$  mgal/m) berechnet werden können. 1984 wurden rund 40 zusätzliche Schwerestationen im schwer zugänglichen Teil des Parks eingerichtet. Helikopter und Boote wurden benötigt, um an diesen Punkten zu messen. Wiederholungsmessungen auf dem gesamten Netz wurden 1983, 1987, 1991 und 1993 durchgeführt. Weiter wurden die Stationen innerhalb der Caldera ebenfalls 1986 und 1989 gemessen, sowie die Linie von Canyon Junction via Fishing Bridge nach Sylvan Lake 1979 und jährlich von 1986 bis 1991.

Es zeigte sich jedoch bald, dass die Schweremessungen nicht präzise genug sind, um genaue Höhenänderungen bestimmen zu können. Weiter ist die Annahme, dass die Höhen- und Schwereänderungen mit dem Freiluftgradienten gekoppelt sind, nicht zulässig. Es ist eher so, dass Massenbewegungen in der Erdkruste durch einen Vergleich der Höhen- und Schwereänderungen bestimmt werden können.

Die Schweremessungen wurden mit bis zu drei LaCoste & Romberg Gravimetern, Modelle D und G, gleichzeitig durchgeführt. Die Messungen wurden ausgewertet, indem zunächst die Gezeiten korrigiert wurden. Da die Instrumente auf einer Station immer mit gleicher Höhe aufgestellt werden, braucht es keine Korrektur der Instrumentenhöhe. Danach wurde für alle verwendeten Instrumente jeweils eine lineare Drift für eine bestimmte Zeit angesetzt und die Messungen aller Instrumen-

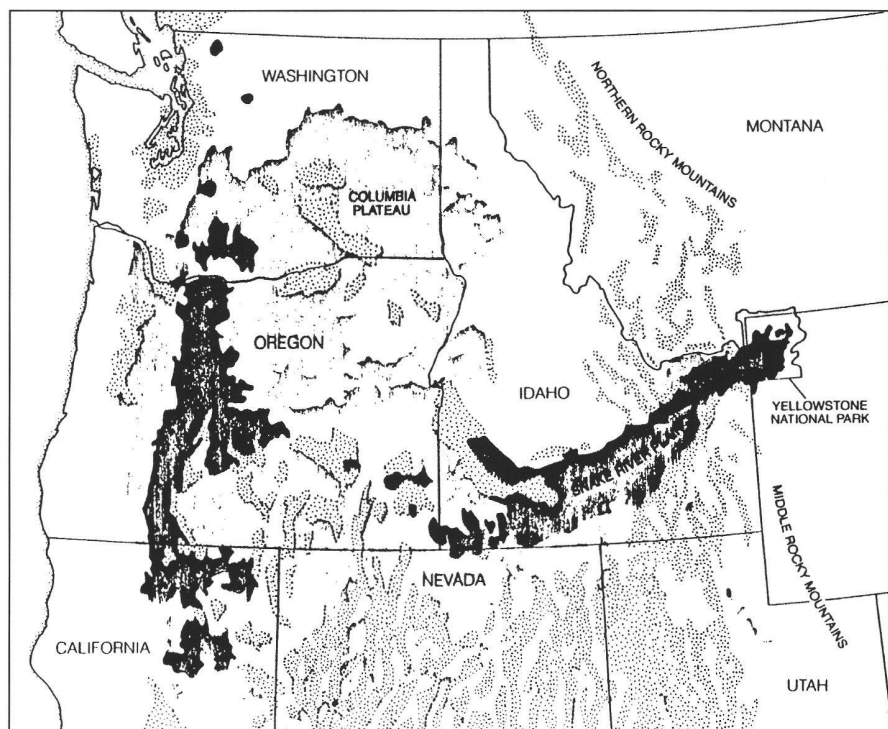
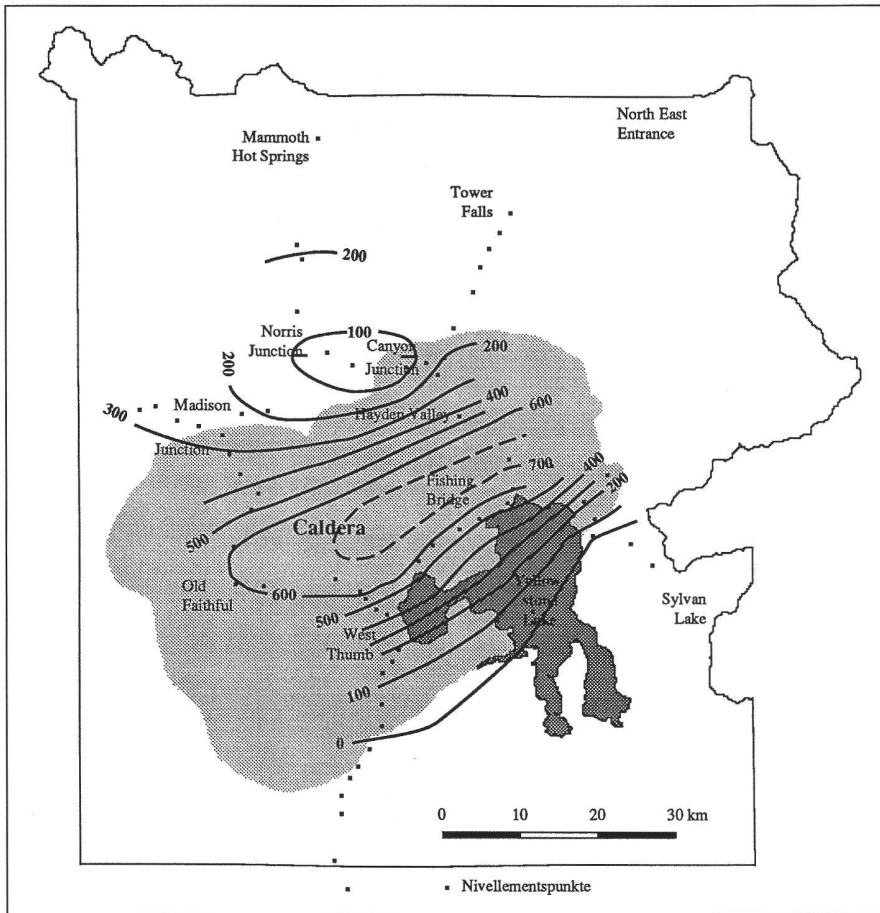


Abb. 1 : Tektonische Karte [nach Smith und Christiansen, 1980]. Dunkle Gebiete: Jüngste vulkanische Gesteine ( jünger als 2 Mio. Jahre). Helle Gebiete: Cenozoische vulkanische Gesteine. Gepunktete Gebiete: mit Sedimenten gefüllte Täler.

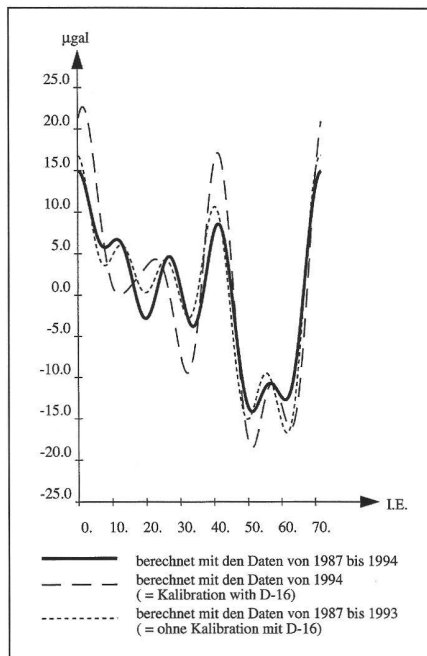


**Abb. 2: Höhenänderung von 1923 bis 1977 (in mm) [nach Pelton und Smith, 1982].**

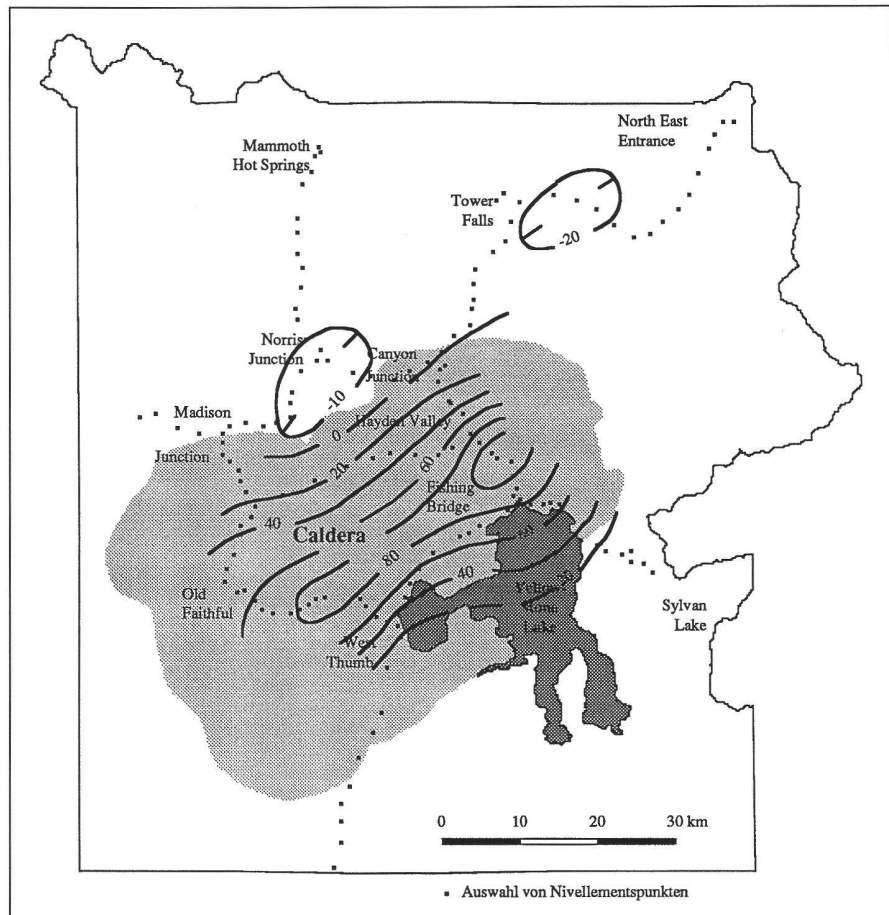
te mit der Methode der kleinsten Quadrate ausgeglichen.

Die Messgenauigkeiten verschiedener Instrumente sind dabei sehr unterschiedlich. Sie variieren von  $\pm 8 \mu\text{gal}$  bis  $\pm 40 \mu\text{gal}$ . Weiter ist es so, dass die Messreihenfolge der Stationen in verschiedenen Jahren nicht immer gleich gewählt wurde. In den ersten Jahren wurden nur einfache Schleifen gemessen. Ab 1987 wurden Leiter-Schleifen angewandt. Bis 1987 kam es auch vor, dass benachbarte Punkte nie direkt miteinander verbunden wurden, was die erreichbare Genauigkeit und Zuverlässigkeit im Netz stark beeinträchtigt.

Die erreichten mittleren Fehler für einen Schwerwert auf einer Station betragen rund  $\pm 10 \mu\text{gal}$ . Bei so grosser Präzision, die für weitere Auswertungen auch gebraucht wird, ist es nötig, systematische Fehler der Instrumente zu berücksichtigen. Ein wesentlicher Fehler könnte ein falscher Umrechnungsfaktor zwischen Instrumentenablesung und Schwerwert sein. Dieser Faktor wird von der Firma LaCoste & Romberg angegeben. Fehler bis  $5 \cdot 10^{-4}$  sind durchaus möglich. Bei Schweredifferenzen von über  $100 \text{ mgal}$ , wie sie im Yellowstone Schwerenetz vor-



**Abb. 4: Modellierung des zyklischen Fehlers des LaCoste & Romberg Gravimeters G-461. (I.E.: Instrumenten Einheiten).**



**Abb. 3: Höhenänderung von 1977 bis 1987 (in mm).**

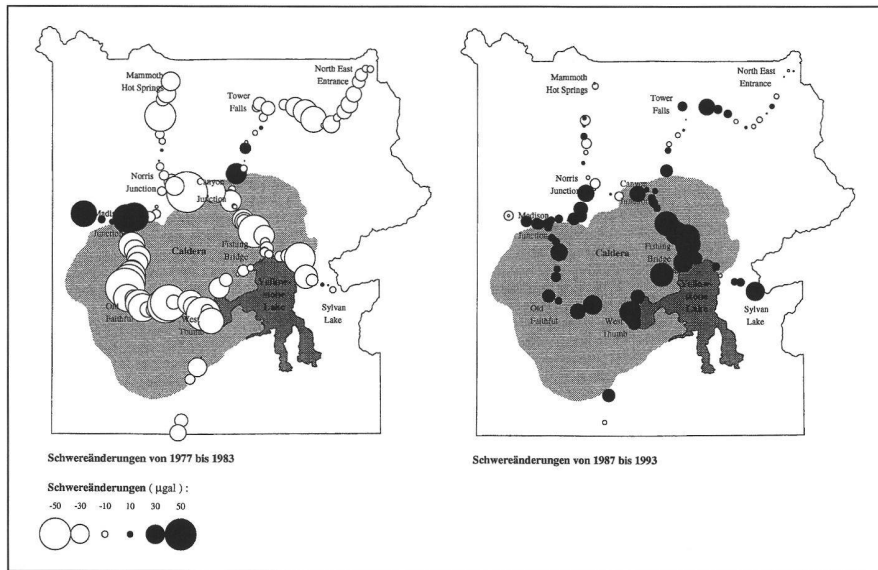


Abb. 5: Schwereänderungen.

Schon mit der ersten Wiederholungsmessung entlang der Linie von Canyon Junction nach Fishing Bridge 1979 konnten Schwereunterschiede bis zu  $-50 \pm 20 \mu\text{gal}$  gemessen werden. Das Vorzeichen entspricht dem, das man von den Höhenänderungen her erwartet. Hingegen ist der Betrag weit höher, als man annehmen könnte. Mit der Annahme einer Höhenzunahme von ungefähr  $2 \text{ cm/Jahr}$  und dem Freilufgradienten  $-0.3 \text{ mgal/m}$  würde man nur rund  $-12 \mu\text{gal}$  erwarten.

Bis 1983 scheint sich die Schwere entlang der Linie nicht mehr signifikant zu geändert zu haben. Im Zeitraum von 1977 bis 1983 wurden entlang der südlich Calderalinie von Madison Junction nach West Thumb eher noch grössere Schwereän-

kommen, ist daher eine Genauigkeit von  $10 \mu\text{gal}$  nicht gewährleistet. Um dieses Problem in den Griff zu bekommen, wurden die zwei Instrumente G 264 und G 461, welche seit 1987 bei jeder Messkampagne dabei waren, 1987 und 1991 auf einer absoluten Schwerelinie mit sechs Punkten südlich von San Francisco überprüft. Das Instrument G 461 wurde auch bei jeder früheren Messkampagne eingesetzt und erzielte normalerweise gute Messgenauigkeiten, so dass die anderen verwendeten Instrumente via dieses Gerät geeicht werden können. Ein weiterer systematischer Fehler, der bei G-Gravimetern bis zu  $30 \mu\text{gal}$  betragen kann, ist ein zyklischer Fehler der Messspindel. Bei D-Geräten ist dieser Fehler bedeutend kleiner ( $< 5 \mu\text{gal}$ ). Diesen Fehler zu korrigieren, erweist sich als ziemlich schwierig. Auf der absoluten Schwerelinie ist es nicht möglich, da sie aus zu wenig Punkten besteht und die Schwerewerte der Stationen zu weit auseinander liegen. Der Vergleich der Resultate zweier verschiedener Instrumente ergibt nur die Differenz der beiden Fehler. Eine Möglichkeit ergibt sich, wenn sich die Messbereiche von zwei Geräten gegeneinander verschieben. Es dauert jedoch im allgemeinen viele Jahre, bis die Verschiebung gross genug ist. Eine einfache Möglichkeit zur Kalibrierung von G-Gravimetern ergibt sich im Vergleich mit einem D-Gravimeter, wenn dabei der zyklische Fehler des D-Gravimeters als Null angenommen wird. Da die Periode des Fehlers bei den D-Geräten viel kürzer ist ( $3.2 \text{ mgal}$ ) als bei den G-Geräten ( $72 \text{ mgal}$ ), wirkt sich zusätzlich ein zyklischer Fehler des D-Gravimeters bei einer Glättung der Kalibrationskurve weniger aus. Eine solche Eichung wurde mit den zwei Gravimetern G 264 und G 461 1994 durchgeführt. Auch mit diesen Korrekturen ist eine Auswertung der Schweredaten relativ heikel, da in einzelnen Jahren ziemlich viele Messfehler auftraten.

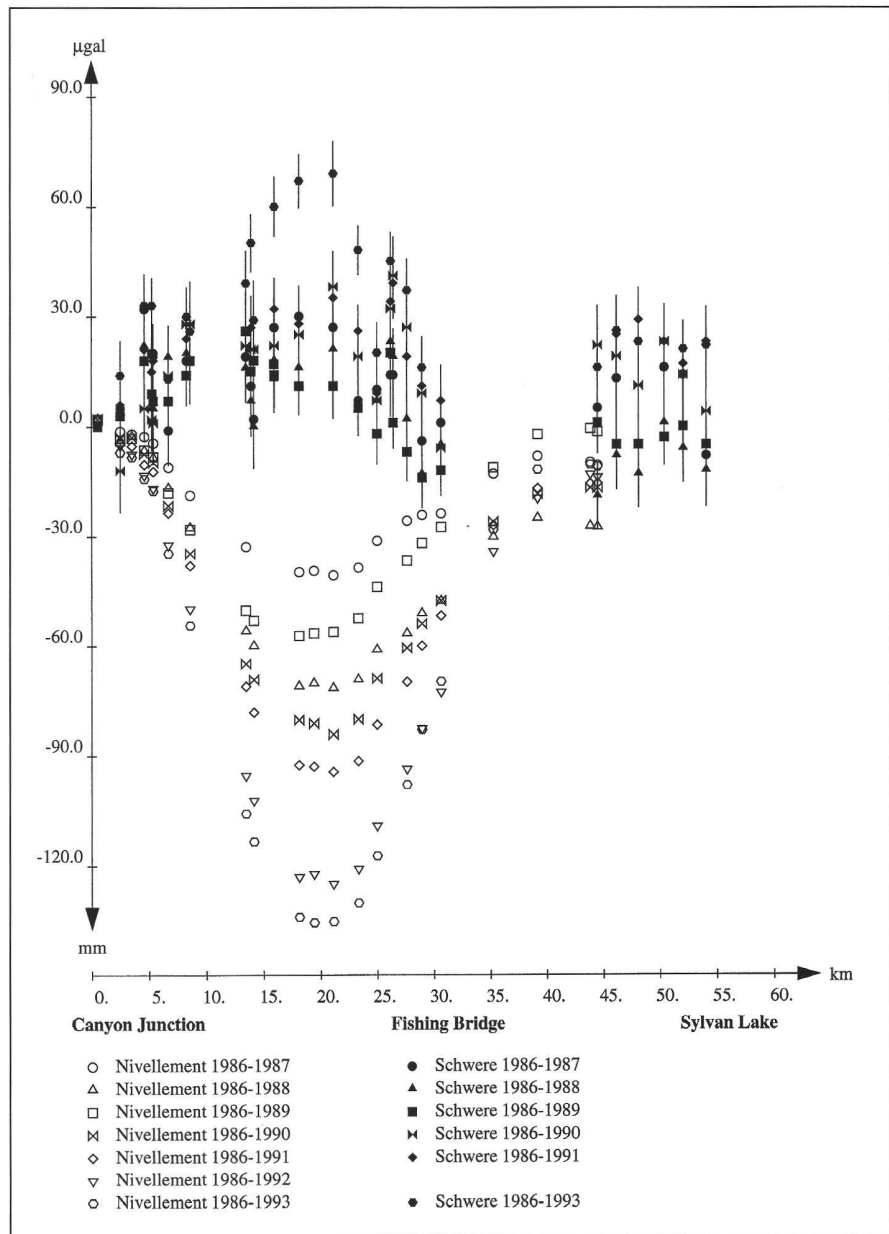


Abb. 6: Höhenänderungen gegenüber Schwereänderungen entlang des Profils Canyon Junction – Fishing Bridge – Sylvan Lake von 1986 bis 1993.



	Höhenabnahme	Höhenzunahme
$f < -0.3 \text{ mgal/m}$	Massenzunahme	Massenverlust
$f = -0.3 \text{ mgal/m}$ Freiluftgradient	keine Massenänderung	keine Massenänderung
$f > -0.3 \text{ mgal/m}$	Massenverlust	Massenzunahme

**Tab. 2: Massenänderungen aus Faktor zwischen Höhen- und Schwereänderung.**

derungen ( $-60 \pm 15 \mu\text{gal}$ ) beobachtet. Ausserhalb der Caldera traten im nördlichen Teil des Yellowstone National Parks ebenfalls negative Schwereänderungen auf. Von 1983 bis 1986 änderte sich die Schwere entlang der südlichen Calderalinie wenig, und entlang der nördlichen nahm sie nochmals etwas ab ( $-25 \pm 10 \mu\text{gal}$ ). 1986 wurden somit in der Yellowstone Caldera die tiefsten Schwerewerte gemessen. Seither nimmt die Schwere wieder zu. Die grössten Schwerezunahmen wurden von 1986 bis 1987 ( $+30 \pm 10 \mu\text{gal}$ ) sowie von 1991 bis 1993 ( $+35 \pm 5 \mu\text{gal}$ ) registriert. Dazwischen sind nur kleinere Änderungen beobachtet worden. Auf der Linie von Madison Junction nach West Thumb ist dabei die Zunahme von 1987 bis 1993 bedeutend kleiner als auf der Linie von Canyon Junction nach Fishing Bridge.

## Vergleich der Schwere- und Nivellementdaten

Eine einfache Abschätzung über Massenänderungen im Untergrund erhält man, wenn man den Faktor zwischen den Höhen- und Schwereänderungen betrachtet. Ist dieser gleich dem Freiluftgradienten, so können Höhenänderung rein auf Ausdehnen resp. Zusammenziehen von Material zurückgeführt werden. Andere Fälle können in der Tabelle 2 nachgeschaut werden.

In Abbildung 6 sind die Schwereänderungen gegenüber den Höhenänderungen entlang der nördlichen Calderalinie dar-

gestellt. Daraus ist ersichtlich, dass die Schwere zwischen 1987 und 1991 signifikant kaum änderte, während in derselben Zeit die Höhe um bis zu 50 mm abnahm. Dies lässt sich nur durch einen Massenverlust im Untergrund erklären. Da der Faktor zwischen Höhen- und Schwereänderungen in der Periode von 1986 bis 1993 nur unwesentlich vom Freiluftgradienten abweicht ( $-0.35 \pm 0.07 \text{ mgal/m}$ ), muss der Massenverlust, wegen der grossen Schwereänderungen, von 1986 bis 1987 und von 1991 bis 1993 kompensiert werden.

Zur Zeit werden Versuche unternommen, solche Effekte sinnvoll zu modellieren.

### Literatur:

Arnet, F., R.B. Smith and E.E. Klingelé, 1991: Temporal Variations in Gravity Across the Yellowstone Caldera. AGU Chapman Conference, Annapolis.

Arnet, F., 1993: Crustal Deformation Studies in the Yellowstone National Park: Part I: Levelling and Gravity Data, IGP-Bericht 220.

Dzurisin, D., J.C. Savage, R.O. Fournier, 1990: Recent crustal subsidence at Yellowstone Caldera, Wyoming. Bulletin of Volcanology, 52:247–270.

Evoy, J.A., 1978: Precision Gravity and Simultaneous Inversion of Gravity and Seismic Data for Subsurface Structure of Yellowstone. University of Utah.

Hohldahl, S.R. and D. Dzurisin, 1991: Time Dependent Models of Vertical Deformation in the Yellowstone-Hebgen Lake Region for the Period 1923–1987. USGS.

Hollis, J.R., 1988: Precision Gravity Reobservation at Yellowstone National Park, Wyoming, 1977–1987. University of Utah.

Meertens, C.M. and R.B. Smith, 1991: Crustal Deformation of the Yellowstone Caldera from First GPS Measurements: 1987–1989, University of Utah.

Meertens, C.M. and R.B. Smith, 1990: Contemporary Deformation of the Yellowstone Caldera from First GPS Measurements: 1987–1989. University of Utah.

Molbert, D.G. and W.T. Dewhurst, 1990: The Yellowstone-Hebgen Lake Geoid obtained Through the Integrated Geodesy Approach. Submitted Journal of Geophysic Research.

Pelton, J.R. and R.B. Smith, 1979: The Analysis of Deformation - Included Variations in Orthometric Height and Gravity with an Application to Recent Crustal Movements in Yellowstone National Park.

Pelton, J.R. and R.B. Smith, 1982: Contemporary Vertical Surface Displacements in Yellowstone National Park. Journal of Geophysic Research, Vol.87, p 2745–2761.

Pelton, J.R. and R.B. Smith, 1979: Recent crustal Uplift in Yellowstone National Park. Science Reprint Series, Vol 206, pp 1179–1182.

Smith, R.B., R.E. Reilinger, C.M. Meertens, J.R. Hollis, S.R. Hohldahl, D. Dzurisin, W.K. Gross, E.E. Klingele, feb. 1989: What's Moving at Yellowstone; EOS, pp. 113–125.

Smith, R.B. and R.L. Christiansen, 1980: Yellowstone Park as a Window on the Earth's Interior. Scientific American 945.

Sylvester, A.G., J.O. Byrd and R.B. Smith, 1991: Aseismic Reverse Displacement across the Teton Fault, Teton Range, Wyoming.

Vasco, D. W., R. B. Smith and C.L. Taylor, 1990: Inversion for Sources of Crustal Deformation and Gravity Change at the Yellowstone Caldera. Journal of Geophysic Research, Vol 95., No B12, p 19839–19856.

Adresse des Verfassers:

Felix Arnet  
Institut für Geodäsie und  
Photogrammetrie  
GGL-ETH Hönggerberg  
CH-8093 Zürich