

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

Herausgeber: Schweizerischer Verein für Vermessung und Kulturtechnik (SVVK) = Société suisse des mensurations et améliorations foncières (SSMAF)

Band: 88 (1990)

Heft: 8

Artikel: ALGESTAR : satellitengestützte Geoidbestimmung in der Schweiz

Autor: Marti, U. / Kahle, H.-G. / Wirth, B.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-234342>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 05.02.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

ALGESTAR: Satellitengestützte Geoidbestimmung in der Schweiz

Ein aktueller Beitrag zur Landesvermessung

U. Marti, H.-G. Kahle, B. Wirth

Das Satelliten-Navigationssystem NAVSTAR-GPS des US Department of Defence (DoD) ist seit einiger Zeit auch für geodätische Zwecke anwendbar. Mit ihm lassen sich im Bereich von 100 km 3-dimensionale Koordinaten mit wenigen cm Genauigkeit bestimmen.

Im Projekt ALGESTAR zur satellitengestützten Geoidbestimmung im Alpenraum wurde GPS vor allem für Höhenmessungen eingesetzt. GPS ermöglichte die Bestimmung von 40 gleichmässig über die Schweiz verteilten Stationen innerhalb von nur 4 Tagen. Die Genauigkeit betrug dabei im Mittel ca. 5 cm.

Durch den Vergleich der aus GPS resultierenden ellipsoidischen Höhen mit den Höhen der Schweizerischen Landesvermessung erhält man Informationen über das Geoid der Schweiz. In relativ kurzer Zeit ist es in diesem Projekt gelungen, seine Form mit einer Genauigkeit von etwa 10 cm zu bestimmen. Durch die zukünftige Kombination aller Informationen, welche uns über das Schwerefeld in der Schweiz zur Verfügung stehen (GPS, Astro-geodätische Messungen, Schwere-messungen, digitales Geländemodell) wird es sehr bald diskutierbar, ob das Geoid auch im Alpenraum mit einer Genauigkeit von ca. 1 cm bestimmt werden kann: ein international erklärtes weltweites Ziel für die Neunziger Jahre.

Die Kenntnis des Geoides mit dieser Genauigkeit ist eine wichtige Voraussetzung für die vollumfängliche Nutzung von GPS in der Landesvermessung. Bekanntlich werden die klassisch-terrestrischen Messungen im Erdschwerefeld ausgeführt. Für die Transformation zwischen terrestrischen und GPS-Messungen müssen die Geoidundulationen bekannt sein.

Le système de navigation GPS, développé par le département de défense des Etats Unis (DoD) peut être utilisé pour des fins géodésiques et permet la détermination de coordonnées tridimensionnelles avec une précision relative de quelques centimètres sur une distance d'une centaine de kilomètres.

Dans le projet ALGESTAR, qui a comme but la détermination du géoïde dans les Alpes, 40 points, distribués de façon homogène sur toute la Suisse, ont été mesurés en quatre jours seulement. De ces mesures ont été dérivées les hauteurs ellipsoïdiques avec une précision de 5 cm en moyenne.

En comparant ces hauteurs ellipsoïdiques à celles tirées du nivellement national, il s'est finalement avéré possible de calculer en peu de temps le géoïde avec une précision de 10 cm. Une future amélioration de la précision s'obtiendra par la combinaison de toutes les mesures et informations sur le champ de gravitation terrestre et il n'est pas exclu que même dans les régions alpines, il sera possible d'arriver bientôt à une connaissance du géoïde au centimètre près, ce qui correspond d'ailleurs à un but international de la géodésie pour les années 90.

Pour une intégration des résultats GPS dans des réseaux classiques, surtout en ce qui concerne les hauteurs, il est indispensable d'avoir à sa disposition un géoïde d'une telle précision.

Einleitung

Die Satellitengeodäsie hat in den letzten Jahren auch im Bereich der Schwerefeldbestimmung stark an Bedeutung gewonnen. International gefasste Resolutionen an der letzten Generalversammlung der Internationalen Union für Geodäsie und Geophysik (IUGG) in Vancouver (1987) belegen, dass verstärkt Anstrengungen unternommen werden sollen, um natio-

nale Geoiden im Subdezimeter-Bereich zu bestimmen. Dies ist insbesondere für Hochgebirgsländer mit ihren stark variierenden Geopotentialwerten keine triviale Aufgabe. Hauptsächliche Methoden der Geoidbestimmung stammen traditionellerweise aus der Astrogeodäsie und der Gravimetrie, neuerdings auch aus der Satellitengeodäsie.

Im Zeitraum 1984–1986 wurden mit Unterstützung des Schweizerischen National-

fonds (NF), der ETH Zürich und der Schweizerischen Geodätischen Kommission (SGK) erstmalig in der Schweiz Radiowellenverfahren an Signalen der US Navigationssatelliten TRANSIT erprobt, um geozentrische Stationskoordinaten in einem globalen Referenzsystem zu erhalten. Die internationalen Forschungsarbeiten erfolgten im Verlauf von 2 Unterprojekten: SWISSDOC (Wiget, Geiger, Kahle, 1985) und ALGEDOP (Wiget, Kahle, Geiger, 1986). Die Messungen und Stationsprotokolle für SWISSDOC sind von Wiget und Geiger (1985), diejenigen für ALGEDOP von Geiger und Wiget (1986) ausführlich dokumentiert worden. Die entsprechenden Auswertungen wurden in detaillierten Berichten (Wiget und Geiger, 1986; Geiger und M. Müller, 1987; M. Müller, 1989) publiziert.

Sie bildeten die Grundlage für ein NF-Nachfolgeprojekt, das wir ALGESTAR (Alpine Geoid by Satellite Timing and Ranging) genannt haben. Es soll einen Beitrag zum Schweizer Geoid liefern, das an das globale Weltellipsoid angeschlossen werden kann und auch in den Alpen in den Dezimeter-Genauigkeitsbereich vorstösst. Teilziele sind die Bestimmung von Transformationsparametern zwischen globalen und lokalen Referenzsystemen sowie die Erforschung der Feinstruktur des Schwerefeldes mit späterer geophysikalischer Interpretationsmöglichkeit. In den vergangenen zwei Projektjahren haben wir dazu Pilotstudien, gezielte Testmessungen und instrumentelle Untersuchungen vorgenommen, sowie im letzten Jahr eine Hauptkampagne durchgeführt, deren Ergebnisse wir im folgenden vorstellen.

Die Auswahl der Punkte

Für die GPS-gestützte Geoidbestimmung müssen für jeden Punkt zwei Höhen bekannt sein: Dies sind einerseits die aus den GPS-Messungen resultierenden ellipsoidischen Höhen und andererseits die aus terrestrischen Messungen erhaltenen orthometrischen Höhen. Die Bestimmung der ellipsoidischen Höhen bildet den Schwerpunkt des ALGESTAR-Projektes. Da für ALGESTAR weder Zeit noch Mittel zur Verfügung standen, um auch die orthometrischen Höhen zu bestimmen, mussten wir Messstationen auf nivellierten Punkten einrichten, deren orthometrische Höhen bekannt sind. In erster Linie kamen die Fixpunkte des Schweizerischen Landesnivellements in Frage. Von diesen Punkten sind jedoch die Lagekoordinaten nie bestimmt worden. Für gleichzeitige Lageuntersuchungen werden diese aber zumindest näherungsweise benötigt. Deshalb haben wir uns entschlossen, den Grossteil unserer Stationen auf Triangulationspunkte 3. und 4. Ordnung zu setzen, die an das Landesnivellement ange-

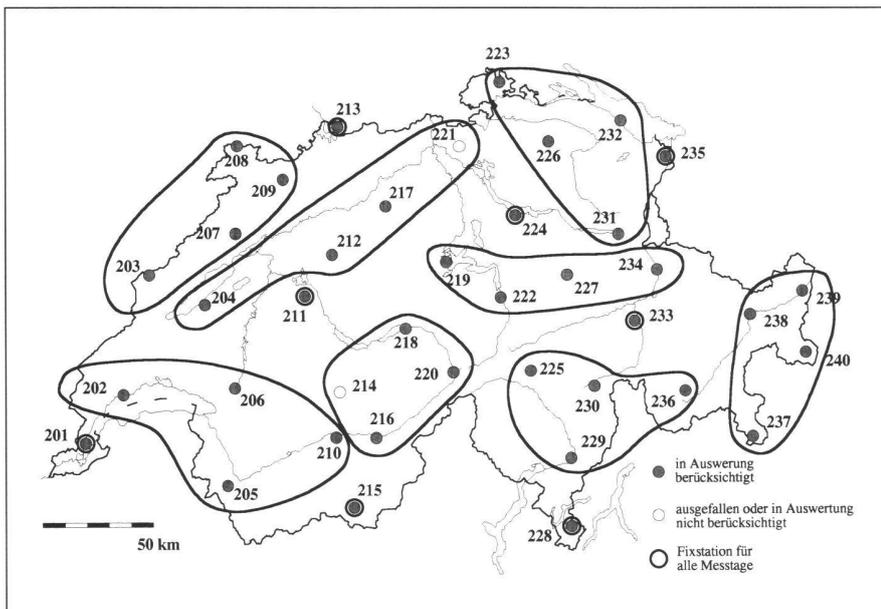


Abb. 1: Messpunktverteilung und Aufteilung der Stationen auf die verschiedenen Operateure.

geschlossen sind. Dies bringt zwar einen kleinen Verlust in der Genauigkeit der Höhe, doch dafür erhält man genügend genaue Lagekoordinaten.

Ausser den Triangulationspunkten haben wir für Vergleichszwecke und um eine Verbindung zu den Messpunkten anderer Kampagnen herzustellen, auch Punkte anderer Art in die ALGESTAR-Kampagne eingeschlossen:

EUREF

Um das Netz in einem übergeordneten Netz zu lagern, wurden die drei Punkte Zimmerwald (211), Chrischona (213) und Monte Generoso (228) des europäischen Referenznetzes (EUREF) (gemessen 1989) besetzt. Dies wird einen Vergleich der Genauigkeiten beider Messkampagnen erlauben, sobald die Auswertungen von EUREF vorliegen.

GRANIT

Für Vergleichszwecke sind aus der GRANIT-Kampagne (1987) (bei welcher die Satellitenstation Zimmerwald in die grössten tektonischen Einheiten der Schweiz rückversichert wurde) die Punkte Chasseral (207), Zermatt (215), Visp (216) und Lägern (221) in ALGESTAR einbezogen worden. Von den EUREF-Punkten Zimmerwald und Monte Generoso sind zudem die Exzentrums-elemente zu den GRANIT-Stationen von der L+T bestimmt worden.

Turtmann

Durch die erneute Besetzung des Punktes Susten (210) sind auch die Stationen des Turtmann-Netzes mit ALGESTAR verbunden (Rothacher et al. 1986, Geiger et al. 1986).

ALGEDOP

Die drei Punkte Grimsel (220), Lukmanier (225) und San Bernardino (230) sind identisch mit den Doppler-Stationen aus der ALGEDOP-Kampagne (M. Müller 1989). Von diesen Stationen liegen zwar keine Lage-Koordinaten vor, aber die Höhen der Bodenpunkte wurden während ALGEDOP durch Nivellieren bestimmt.

Eine Gesamtübersicht der gemessenen Stationen ist Abbildung 1 zu entnehmen. Es könnte angewendet werden, dass die Anzahl von 40 Punkten zu gering ist, um die Detailstrukturen des Geoides zu bestimmen. Für die Schweiz liegen jedoch gute Modelle der Massenverteilung an der Oberfläche und im Erdinnern vor. Das Geoid erhält man mit der bewährten Remove-Restore-Technik, wie es bereits Gurtner (1978) und Marti (1988) bei Geoidbestimmungen aus Lotabweichungsmessungen erfolgreich angewendet haben.

Die Messkampagne

Durch den Einsatz von 16 WM102 Empfängern konnten die 40 Punkte in vier Tagen vom 27.–31. August 1989 gemessen werden.

Unterstützt mit Empfängern und/oder Operateuren wurden wir bei den Messungen von folgenden Firmen/Instituten:

- Firma WILD/Heerbrugg
- C.-H. Aeschlimann SA (GESTER)/Genève
- Institut de Géodésie et de Mensuration, EPF Lausanne
- Geodätisches Institut der Universität Stuttgart

- Institut für Allgemeine Geodäsie der Universität der Bundeswehr München
- Institut für Höhere Geodäsie der Technischen Universität Berlin
- Geodätisches Institut der Universität Karlsruhe

Wir danken allen am Gelingen dieser Kampagne beteiligten Personen und Institutionen für ihren geleisteten Einsatz und hoffen auf weitere gute Zusammenarbeit. Des weiteren danken wir den Kollegen vom Astronomischen Institut der Uni Bern (AIUB) für wertvolle Hilfe bei der Anwendung ihrer Auswertesoftware sowie dafür, dass sie uns die Infrastruktur in der Sternwarte Zimmerwald zur Verfügung gestellt haben.

Die Messdauer betrug pro Messtag vier Stunden. Dies entsprach der Zeitspanne, während welcher sich zur Zeit in Mitteleuropa mindestens vier Satelliten gleichzeitig deutlich über dem Horizont befanden. Acht der 40 Stationen wurden an allen vier Tagen beobachtet. Die übrigen 32 Stationen wurden jeweils nur an einem Tag gemessen, wobei jedem Operateur ein kleines Gebiet zugeteilt war (vgl. Abb. 1). Die gezeigte Messanordnung hat den Vorteil, dass sie homogen ist und sich mögliche Verkippungen der GPS-Lösung weniger gravierend auf die Gesamtlösung aller vier Tage auswirken.

Die GPS-Auswertung

Die Auswertung erfolgte mit der bewährten Software des AIUB (Version 3.1; Rothacher et al. 1988) auf der VAX des Rechenzentrums der ETHZ. Dabei wurde die Analyse in folgenden Schritten vorgenommen:

- *Datenaufbereitung und Transfer* (Umformatierung der WM-Rohdaten ins RINEX-Format, Transfer der RINEX-Files vom PC zum Grossrechner, Umformatierung der RINEX-Files ins Berner Format.)
- *Bereitstellen der Satellitenbahnen* (vier einzelne Bögen getrennt für jeden Messtag.)
- *Code-Processing* (Single Point-Berechnung und Bestimmen der Uhrparameter, mittlere Genauigkeit aller Lösungen: 12,80 m.)
- *Bilden der Phasen-Differenzen* (Bei der Bildung der Basislinien wurde darauf geachtet, dass das Fixpunkt-Netz selbständig lösbar wird. Die übrigen Stationen wurden so an die Fixpunkte angeschlossen, dass die Distanzen möglichst kurz werden.)
- *Daten-Screening, Cycle-slip-Fixing*
- *Bestimmung von Näherungskoordinaten*
Für die absolute Lagerung der Gesamtlösung konnte nur der Punkt Zimmerwald (Nr. 211) verwendet werden, da die Auswertung der EUREF-Kampagne

zum Zeitpunkt der Berechnungen noch nicht vorlag. Verwendet wurde dabei das Mittel aller Laser-Lösungen des DUT/AEROSPACE vom Juli 1989. Diese differieren untereinander im Maximum um 10 cm. Zudem zeigen sie eine gute Übereinstimmung mit den Lösungen anderer Institutionen (IfAG 1986, NASA 1987, DUT/FOG 1989). Folgende Werte wurden als Lagerung des ALGESTAR-Netzes verwendet:

X = 4331297.192
Y = 567555.486
Z = 4633133.411

Die Abweichung zur GPS-Single-Point-Lösung nimmt folgende Beträge an:

$\Delta X = -0,924$ m
 $\Delta Y = +2,600$ m
 $\Delta Z = +2,667$ m

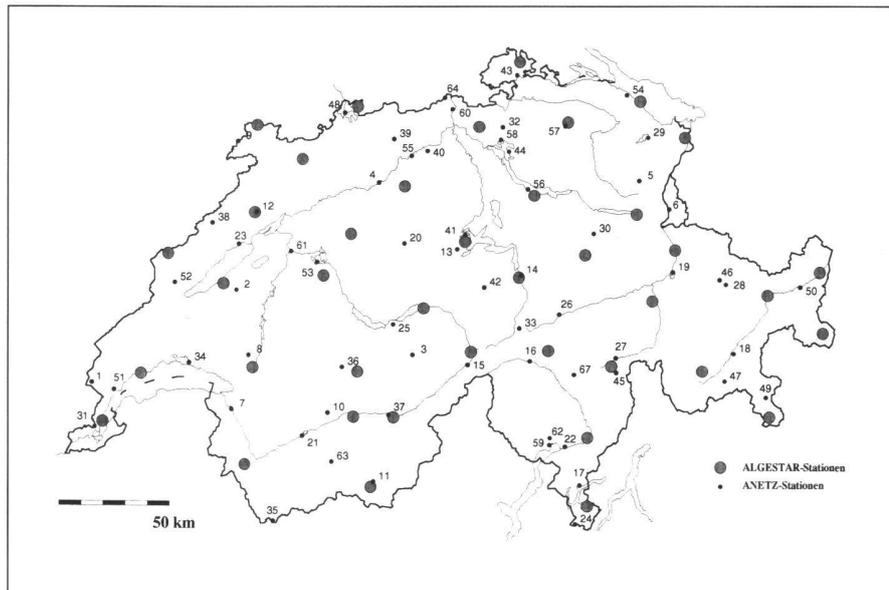


Abb. 2: Verteilung der ANETZ-Stationen relativ zu den Messpunkten.

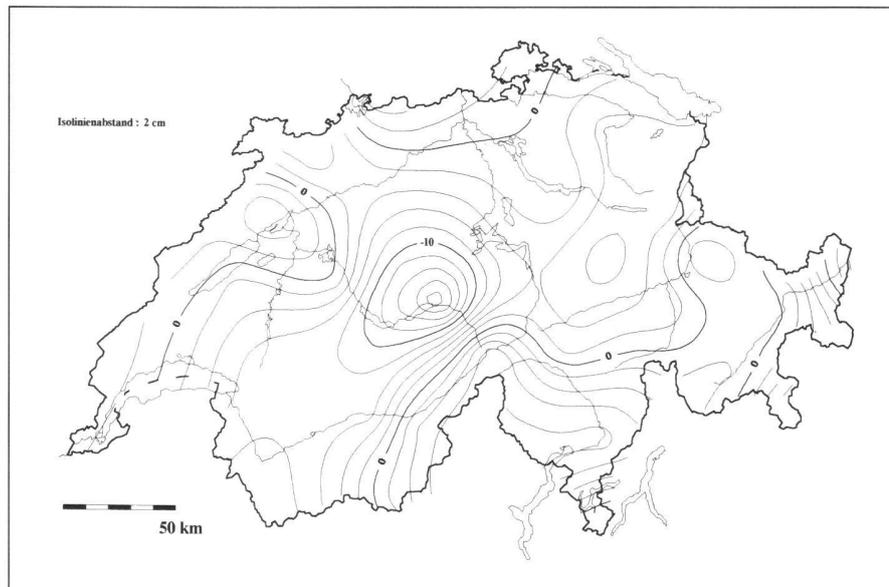


Abb. 3: Unterschiede in den GPS-Höhen, verursacht durch verschiedene Meteo-Modelle.

– Meteo-Werte

Einerseits stehen die Standard-Modelle zur Verfügung, welche in der GPS-Software des AIUB fest implementiert sind. Dabei werden die Meteo-Werte als Funktion der Stationshöhe eingeführt. Die Berechnung einer Phasendifferenzlösung mit diesen Modelldaten liefert bereits gute Ergebnisse und hat zudem den Vorteil, dass bei extremen Wetterlagen (z.B. Inversionslagen) keine grob falschen Werte in die Berechnung einfließen. Für Modellierungen der Troposphäre in der Schweiz können andererseits zudem die Daten des Automatischen Stationsnetzes (ANETZ) der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt (SMA) verwendet werden (Abb. 2). Mit diesen Werten ist es möglich, durch Interpolation ein Troposphärenmodell zu konstruieren, welches auch eine orts- und zeitabhängige Komponente aufweist. Für die Berechnung der Phasendifferenzlösung wurde sowohl mit dem Standardmodell der Berner-Software als auch mit dem Modell aus den ANETZ-Messungen gearbeitet.

In Abbildung 3 ist (der Auswertung etwa vorgegriffen) die Differenz beider Meteo-Modelle bezüglich der GPS-Höhen dargestellt. Im grössten Teil der Schweiz sind die Unterschiede kleiner als 5 cm. Einzig in der Brienersee-Region zeigen sich Unterschiede von mehr als 10 cm über relativ kurze Distanzen. Das Maximum konzentriert sich dabei um die ALGESTAR-Station Brienz, wo falsche Meteo-Werte vorliegen dürften.

– Berechnung der Phasendifferenzlösung

Diese Berechnungen wurden in zwei Schritten durchgeführt. Zunächst wurde das Netz der Fixpunkte über alle vier Tage berechnet. Die daraus resultierenden Koordinaten wurden nun fixiert und die weiteren Punkte in dieses Netz eingefügt.

GPS-Resultate

Vergleiche zwischen den Gesamtlösungen für verschiedene Meteo-Modelle

Der Vergleich zwischen den Gesamtlösungen über alle vier Tage mit und ohne ANETZ-Meteo-Daten ergab folgende maximale Abweichungen:

Wie bei Variantenrechnungen mit verschiedenen Meteo-Modellen zu erwarten war, zeigten sich die grössten Differenzen in den Höhen. Falls wir die Höhe von Zimmerwald in beiden Varianten festhalten, so beträgt die grösste durch das Meteo-Modell verursachte Differenz 11,0 cm. Im Mittel betragen die Abweichungen weniger

als 4 cm. Auch in der Lage gab es einige Änderungen, allerdings maximal nur 2 cm. Beim Massstab liessen sich keine systematischen Unterschiede feststellen.

Der mittlere Fehler einer einzelnen Single-Differenz-Beobachtung lag bei beiden Lösungen bei 4,0 cm. Dass die Lösung aus den ANETZ-Daten signifikant besser ist, konnte nicht nachgewiesen werden.

Die innere Genauigkeit der einzelnen Koordinaten beträgt im Mittel etwa 5 mm. Aus Vergleichen mit verschiedenen Berechnungen von Tageslösungen geht allerdings hervor, dass dies kein realistisches Mass für die äussere Genauigkeit darstellt.

Vergleiche mit den Resultaten anderer Kampagnen

Distanzvergleiche haben gezeigt, dass über längere Strecken maximale Abweichungen von bis zu einem ppm auftreten können. Im Mittel beträgt die Abweichung etwas weniger als 0,5 ppm. In einzelnen Punkten, wo bei den Messungen grössere Unterbrüche vorkamen, wurden diese Werte aber auch überschritten.

Die Aufbereitung der terrestrischen Höhen

Im allgemeinen stehen für die Stationen Höhenwerte zur Verfügung, welche von einem Anschluss an das Landesnivellementsnetz stammen. Diese Anschlussmessungen sind aber zu stark unterschiedlichen Zeitpunkten durchgeführt worden. Die publizierten Höhen stimmen zudem nicht mit den zur Geoidberechnung gebrauchten orthometrischen Höhen überein. Um diese aus den Gebrauchshöhen zu erhalten, kann man zwei Methoden anwenden:

Berechnung orthometrischer Höhen aus Rohnnivellement und Schweredaten

Als Ausgangshöhen dienen die geopotentiellen Knoten der im REUN (Réseau Européen Unifié de Nivellement) ausgeglichenen Knotenpunkten der Hauptlinien. Von den Knotenpunkten aus erhält man die geopotentiellen Knoten der gesuchten GPS-Stationen durch Integration der Schwerewerte entlang des Nivellementsweges. Die orthometrischen Höhen erhält man anschliessend aus den geopotentiellen Knoten durch Division durch die mittlere Schwere entlang der Lotlinie. Zur Berechnung der mittleren Schwere entlang der Lotlinie steht das Programm LOST von B. Wirth zur Verfügung. Dieses berechnet den gesuchten Wert aus einem Massenmodell der Schweiz, wie es bereits Gurtner 1978 eingeführt hatte. Es enthält ein 500-Meter-Raster der Topographie sowie ein Modell der Krusten-Mantelgrenze und des Ivreakörpers von jeweils 5 km Maschenweite.

Näherungsweise Bestimmung orthometrischer Korrekturen aus Massen

Für die Auswertung der ALGESTAR-Kampagne wurde ein näherungsweise Berücksichtigen der Nichtparallelität der Niveauflächen aus Massenmodellen gewählt. Dabei berechnet man das durch die Modellmassen verursachte Störpotential sowohl auf Höhe der Station sowie auch auf Meereshöhe. Der Potentialunterschied, dividiert durch die mittlere Schwere, ergibt eine gute Näherung für die orthometrische Korrektur. Bei der Berechnung wurde wiederum das von Gurt-

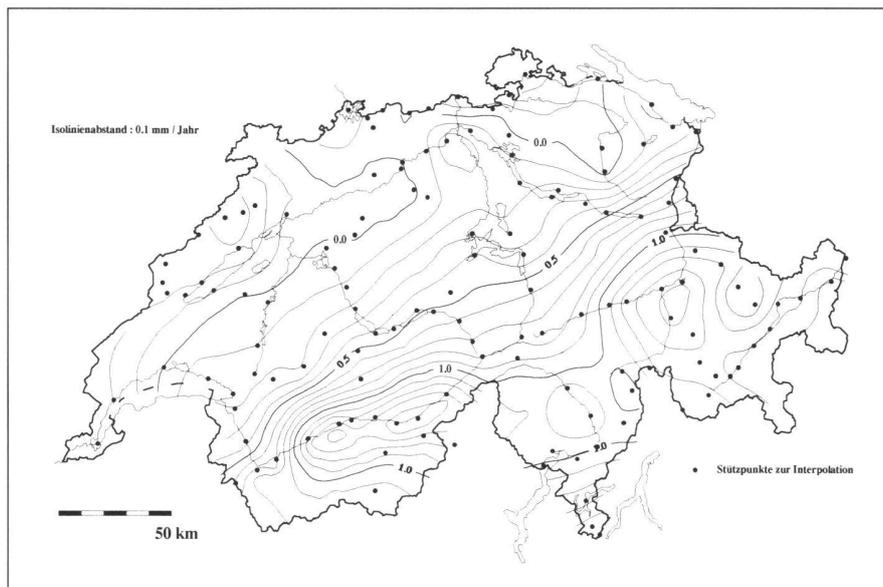


Abb. 4: Jährliche Hebungsraten relativ zur Referenzmarke in Aarburg (nach Daten des Bundesamtes für Landestopographie).

ner 1978 eingeführte Massenmodell verwendet. Mit der Einführung der neuesten Modelle, wie sie heute an unserem Institut zur Verfügung stehen, wird die Genauigkeit noch zunehmen.

Die Alpenhebung

Die wiederholten Ausführungen des Schweizerischen Landesnivellements haben aufgezeigt, dass der Prozess der Alpenhebung noch andauert. Bezüglich des Mittellandes sind signifikante Hebungsraten von bis zu 1,5 mm pro Jahr bekannt (Gubler et al. 1981), die geodynamisch interpretiert werden können (Geiger, Kahle, Gubler, 1986). Da die früheren Höhenbestimmungen der ALGESTAR-Stationen zu unterschiedlichen Zeitpunkten durchgeführt wurden (in einem Bereich von etwa 60 Jahren), muss die Modellierung der Alpenhebung zumindest in Betracht gezogen werden. Massgebende Grössen sind dabei neben den Hebungsraten die Zeitpunkte, an welchem die Messungen der Nivellementslinien durchgeführt wurden. Damit lassen sich die orthometrischen Höhen auf den einheitlichen Zeitpunkt der GPS-Messungen umrechnen. In Abbildung 4 erkennt man, dass sich die Gebiete mit den grössten Hebungen im Rhonetal bei Brig/Visp und in Graubünden befinden. Dort liegen glücklicherweise Nivellements neueren Datums vor. Daraus ergeben sich im Zeitraum zwischen der Ausführung der Nivellements und der Durchführung der ALGESTAR-Kampagne maximale Hebungen von 5 bis 8 cm im Engadin, den südlichen Bündner Tälern und im Glarner Land. In den übrigen Gebieten der Schweiz sind die Hebungsbeträge nirgends grösser als 1,8 cm (Jura). Die Grössenordnung der Hebungsraten zeigt jedoch, dass für eine Geoidberechnung aus

älteren Nivellements Höhen, oder aus Anschlüssen an alte Nivellementslinien die Alpendynamik nicht vernachlässigt werden darf.

Die Berechnung des Geoides

Da die Geoidhöhen im Schweizer Datum gesucht sind, müssen die globalen geozentrischen GPS-Koordinaten aus dem WGS-84-System vorgängig transformiert werden. Die dazu nötigen Transformationsgrössen sind aber noch nicht genau genug bekannt. Sie müssen aus dem gleichen Datenmaterial vorgängig bestimmt werden. Der übliche Ansatz zur Transformation zweier kartesischer Koordinatensätze lässt sich folgendermassen darstellen:

$$\bar{X}_2 = \Delta \bar{X} + m \cdot D \cdot \bar{X}_1$$

Der 2. Koordinatensatz (X_2) (Besselkoordinaten) wird als Funktion des anderen Satzes (X_1) (WGS84-Koordinaten) mit 7 Parametern (3 Translationen, 1 Massstabsfaktor, 3 Rotationen) dargestellt. Berechnungen dieser Transformationsprobleme lösen wir an unserem Institut standardmässig mit dem Programm ATRA (Schmid, Heggli 1978).

Es ergaben sich folgende Transformations-Parameter:

$$\begin{aligned} \Delta X &= 662,481 \text{ m} \pm 3,91 \text{ m} \\ \Delta Y &= 21,726 \text{ m} \pm 2,90 \text{ m} \\ \Delta Z &= 364,964 \text{ m} \pm 3,83 \text{ m} \\ m &= 1.0000057 \pm 0.00000038 \\ \alpha &= 0,64 \text{ }^\circ\text{c} \\ \beta &= 2,09 \text{ }^\circ\text{c} \\ \gamma &= 2,16 \text{ }^\circ\text{c} \end{aligned}$$

Die Restklaffen an den einzelnen Punkten betragen weniger als 30 cm (ausser im Tessin und im Engadin). Als Mittel der Re-

siduen ergab sich der Wert von 11,7 cm. Interessant an diesen Parametern ist der Massstabsunterschied von 5,7 ppm, der auch schon früher aufgedeckt worden ist (Bürki et al. 1987). Dies macht zum Beispiel auf die Distanz von Zimmerwald zum Monte Generoso ca. 90 cm aus.

Geoidberechnung in den Stützpunkten

Mit den berechneten Parametern können nun die GPS-Lösungen vom WGS84 ins Schweizer System übertragen werden (Transformationsprogramm TRAFO von M. V. Müller). Daraus erhält man die Geoidundulationen in den Stützpunkten durch Differenzbildung. Da wir eine einfache Helmert-Transformation mit identischem Gewicht für alle Koordinaten durchgeführt haben, entspricht die Lagerung des Ellipsoides nicht exakt derjenigen, wie sie Gurtner verwendet hat. Gurtner hat die Referenzhöhe des Goides so angesetzt, dass die Undulation in Schwerzenbach den Wert 0 erhält. Aus der Transformation erhalten wir jedoch einen Wert von etwa 8 cm. Für den weiteren Verlauf der Betrachtungen wird dies aber nicht korrigiert.

Interpolation der Geoidhöhen

Es ist nicht zweckmässig, zur Interpolation die beobachteten Geoidhöhen zu verwenden, da sie stark mit der Topographie korreliert sind. Dies ergibt insbesondere in den Alpen hochfrequente Undulationsunterschiede, welche schwer interpolierbar sind. Stattdessen haben wir das von W. Gurtner eingeführte Modell von Topographie, Moho-Diskontinuität und Ivreakörper verwendet. Ähnlich wie bei der Geoidbestimmung aus Lotabweichungsmessungen zeigen die reduzierten Grössen einen ruhigen Verlauf und können leicht interpoliert werden.

Nach der Interpolation wurden die Wirkungen der zuvor reduzierten Massenmodelle auf den berechneten Gitterpunkten berechnet und zum Cogeoid addiert. Damit erhält man ein fein strukturiertes Geoid (Abb. 5). Es weist eine Genauigkeit von 10 bis 15 cm über die ganze Schweiz auf. Durch die Einführung eines verbesserten Massenmodells, durch eine sorgfältige Auswahl der Messpunkte und eine strenge Aufbereitung der Nivellements Höhen wird die Genauigkeit in Zukunft noch weiter verbessert werden.

Vergleiche mit bestehenden Geoiden der Schweiz

Der Vergleich mit dem astro-geodätischen Geoid von W. Gurtner zeigt, dass die Differenzen in den meisten Teilen der Schweiz kleiner als 20 cm sind (Abb. 6). Lediglich entlang des Rheintales und in Mittelbünden steigen die Differenzen bis zu 40 cm an. Dies dürfte durch die Punktverteilung erklärbar sein. Die Stützpunktdichte so-

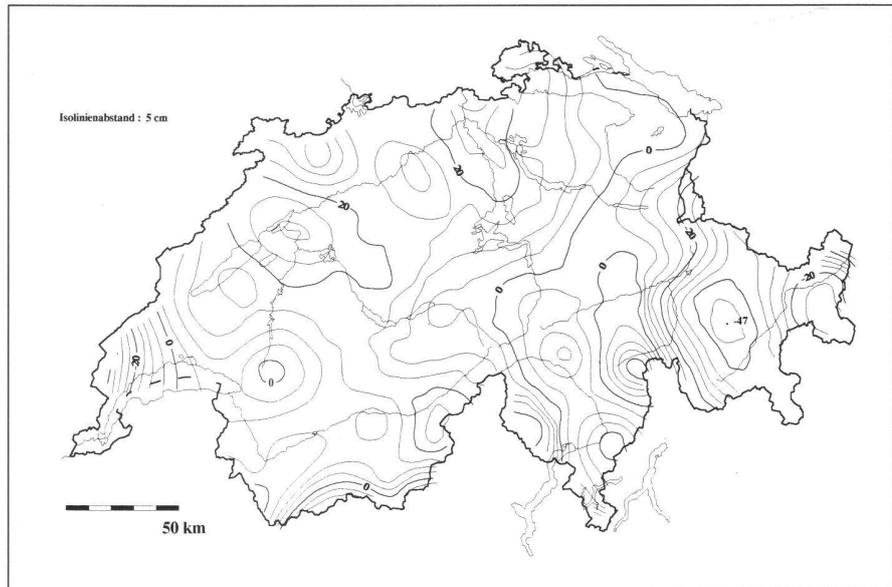


Abb. 5: Geoid im Schweizer Datum.

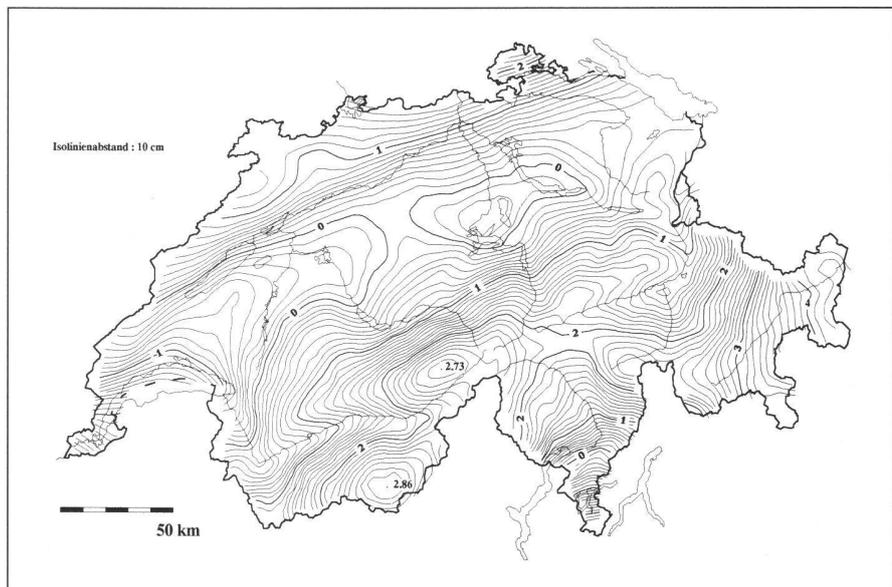


Abb. 6: Differenzen zum astrogeodätischen Geoid von W. Gurtner.

wohl des astro-geodätischen wie auch des satellitengeodätischen Geoides ist dort gering.

Der Vergleich mit dem gravimetrischen Geoid von A. Geiger (Geiger, 1989) zeigt ähnliche Hauptmerkmale der Differenzen. Die Unterschiede nehmen allerdings grössere Beträge an als beim astrogeodätischen Geoid. Dies ist nicht verwunderlich, da das gravimetrische Geoid unabhängig von den beiden anderen ist. Dies zeigt sich insbesondere auch darin, dass die Differenzen, als Folge, dass beim gravimetrischen Geoid kein Massenmodell verwendet wurde, viele hochfrequente Anteile aufweisen. In den Randgebieten (Wallis, Graubünden, z.T. auch Tessin) divergieren das gravimetrische und das satellitengestützte Geoid sehr rasch. Im Mit-

tel betragen die Differenzen aber doch nur 20 cm.

Schlussbemerkungen

Das Pilotprojekt ALGESTAR hat gezeigt, dass mit relativ geringem Aufwand aus GPS-Messungen und vorhandenen Nivellementsdaten ein Geoid bestimmt werden kann, welches genauigkeitsmässig mit Geoidberechnungen aus gravimetrischen und astro-geodätischen Messungen vergleichbar ist. Durch die Messung von 40 Punkten in einem Zeitraum von nur vier Tagen ist es gelungen, das Geoid mit etwa dm-Genauigkeit zu bestimmen. Die Genauigkeit kann noch gesteigert werden, wenn die bereits existierenden verbesser-

ten Massenmodelle in den Berechnungen berücksichtigt werden. Diesen Schritt werden wir an unserem Institut sehr bald vollziehen. Im weiteren hat sich gezeigt, dass es nötig ist, jeden GPS-Punkt mindestens zwei Mal zu besetzen. In ein bis zwei Jahren wird das GPS-System soweit installiert sein, dass auch bei unterschiedlichen Satellitenkonstellationen beobachtet werden kann. Damit lassen sich weitere systematische Fehlereinflüsse eliminieren. Zudem wird im selben Zeitraum die Neuvermessung des Landesnivellements inklusive Schweremessungen abgeschlossen sein. Damit kann auch die Berechnung der orthometrischen Höhen in der ganzen Schweiz exakt durchgeführt werden. Aus diesem Grund erwarten wir noch einmal eine wesentliche Verbesserung des satellitengestützten Geoides durch das grossangelegte Messprojekt des Bundesamtes für Landestopographie (L+T), welches bei grösserer Punktdichte als bei ALGESTAR unter anderem auch dieses Ziel verfolgt.

Für die Berechnung eines Geoides mit cm-Genauigkeit, wie dies eine Resolution der IUGG auch für Gebirgsregionen fordert, wird es allerdings kaum genügen, sich allein auf GPS-Messungen zu stützen. Vielmehr müssen dafür möglichst alle vorhandenen Informationen über das Schwerefeld (Lotabweichungen, Schwere- und Massenmodelle) gemeinsam ausgewertet werden. Zudem müssen in einigen Gebieten der Schweiz und im angrenzenden Ausland noch zusätzliche Messungen durchgeführt werden. Die Massenmodelle bedürfen ebenfalls einer Verbesserung. So wird zum Beispiel die Wirkung der Topographie immer noch mit einer einheitlichen Oberflächendichte berechnet. Wir erwarten durch die Einführung von regional verschiedenen Dichtewerten die wirksamste Verbesserung des Modells des Erdpotentials. Die Auswerteprogramme und zusätzlichen Informationen stehen zum Teil schon zur Verfügung. Allerdings ist deren Integration in bereits bestehende Programme noch ausstehend.

Die integrierte Geoidbestimmung unter Verwendung aller Geodaten ist Gegenstand einer zukünftigen gemeinsamen Anstrengung des AIUB, der L+T und des IGP im Rahmen der Schweizerischen Geodätischen Kommission (SGK). Hierzu ist kürzlich eine SGK-Arbeitsgruppe etabliert worden, die auch die Kontakte zur internationalen Geoid-Kommission der IAG pflegen wird.

Zusammengefasst darf gesagt werden, dass das aus ALGESTAR resultierende Geoid eine zufriedenstellende Genauigkeit aufweist, besonders, wenn man die knappe Zeit berücksichtigt, die dazu zur Verfügung stand. Auf jeden Fall wurden einmal mehr die Möglichkeiten aufgezeigt, welche mit GPS zur Verfügung stehen. Bis zur Erreichung eines Geoides mit cm-Ge-

nauigkeit bleibt allerdings noch einiges zu tun.

Eine ausführliche Dokumentation der in diesem Artikel zusammengefassten Ergebnisse ist im Schlussbericht des entsprechenden Nationalfondsprojektes enthalten (Marti, 1990). Wir danken dem Nationalfonds, der ETH Zürich und der SGK der Schweiz. Akademie der Naturwissenschaften für die finanzielle Unterstützung und allen beteiligten Kollegen und Instituten, die wesentlich zum Gelingen von ALGESTAR beigetragen haben.

Referenzen:

Bürki B., A. Geiger, H.-G. Kahle, W. Gurtner, P. Dunn 1987: The Swiss Trans-Alpine Laser-Experiment Monte Generoso-Jungfrauoch-Zimmerwald. 12th NASA's CDP Meeting, JPL, Pasadena.

Ehrnsperger W., J. J. Kok 1986: Status and results of the 1986 adjustment of the united european levelling network – UELN.

Geiger A. 1989: Gravimetrisches Geoid der Schweiz: Potentialtheoretische Untersuchungen zum Schwerefeld im Alpenraum. Dissertation der ETHZ Nr. 9009.

Geiger A., H.-G. Kahle, D. Schneider, M. Rothacher, G. Beutler, W. Gurtner 1986: Das GPS-Testnetz Turtmann: Netzanlage und Messkampagne 1985. VPK 7/1986.

Geiger A., H.-G. Kahle, E. Guber 1986: Recent Crustal Movements in the Alpine-Mediterranean Region Analyzed in the Swiss Alps. *Tectonophysics* 130, p 289–298.

Geiger A., A. Wiget 1986: Dopplermessungen für das Projekt ALGEDOP. Anwendung des U.S. Satelliten-Navigationssystems TRANSIT in der Schweiz. Teil 1: Messungen und Stationsprotokolle. IGP-Bereich Nr. 101.

Geiger A., M. Müller 1987: Dopplermessungen für das Projekt ALGEDOP. Anwendung des U.S. Satelliten-Navigationssystems TRANSIT in der Schweiz. Teil 2: Auswertung und Interpretation. IGP-Bereich Nr. 138.

Gubler E., H.-G. Kahle, E. Klingelé, St. Müller, R. Olivier 1981: Recent crustal movements in Switzerland and their geophysical interpretation. *Tectonophysics* 71.p. 125–152.

Gurtner W. 1978: Das Geoid der Schweiz. IGP-Mitteilungen Nr. 20.

Kahle H.-G., A. Geiger, A. Wiget 1986. Satellitengeodätische Methoden mit Hilfe von Radiowellenmessungen: TRANSIT und NAVSTAR/GPS. IGP-Bereich Nr. 190.

Marti U. 1988: Astrogeodätische Geoidbestimmung in der Ivrea-Zone. IGP-Bereich Nr. 153.

Marti U. 1990: ALGESTAR, Satellitengestützte Geoidbestimmung in der Schweiz mit GPS. Wiss. Schlussbericht zu NF-Projekt (IGP-Bereich in Bearbeitung).

Müller M. 1989: SWISSDOC und ALGEDOP: Ein (beinahe schon) abgeschlossenes Kapitel der Satellitengeodäsie; das Jahrzehnt des Satelliten-Dopplerverfahrens in der Schweiz. VPK 8/1989.

Rothacher M., G. Beutler, W. Gurtner, T. Schildknecht 1988: Documentation for the Bernese GPS Software Version 3.0.

Rothacher M., G. Beutler, W. Gurtner, A. Geiger, H.-G. Kahle, D. Schneider 1986: The 1985 Swiss GPS Campaign. In: Proc. 4th Int. Symp. Sat. Pos. p. 979–992.

Rothacher M., W. Gurtner, G. Beutler, T. Schildknecht, I. Bauersima 1989: Geodätische Verbindung der West- und Osttraverse: Stand der GPS-Auswertungen. Bericht Nationales Forschungsprogramm «Geologische Tiefenstruktur der Schweiz» NFP 20.

Schmid H. H., S. Heggli 1978: Räumliche Koordinatentransformationen. IGP-Mitteilung Nr. 23.

Wiget A., A. Geiger, H.-G. Kahle 1985: Die Dopplermesskampagne SWISSDOC: Ein Beitrag zur Landesvermessung in der Schweiz. VPK 2/85.

Wiget A., A. Geiger 1986: Schweizerische Doppler-Messkampagne SWISSDOC 84. Anwendung des US Satelliten-Navigationssystems TRANSIT in der Schweiz. Teil 2: Auswertungen und Ergebnisse. IGP-Bereich Nr. 113.

Wiget A., H.-G. Kahle, A. Geiger 1986: ALGEDOP: Ein Beitrag zur satellitengestützten Geoidbestimmung in der Schweiz. VPK 5/86.

Wirth B. 1989: Terrestrischer Präzisionspolygonzug Visp-Zermatt. Kombination mit GPS. Auswertung und Zusammenstellung der im Diplomvermessungskurs 1987 erhobenen Messungen. IGP-Bereich Nr. 159.

Schweizerische Meteorologische Anstalt 1978: Automatisierung der Beobachtungsnetze in der Schweiz. Kurzbericht der Projektgruppe PAN.

Schweizerische Meteorologische Anstalt 1985: Charakteristiken der ANETZ-Daten. Beiträge zum ANETZ-Daten Kolloquium vom 17. April 1985 in Zürich.

Abkürzungen:

UELN	United European Levelling Network
CDP	Crustal Dynamics Project
VPK	Vermessung Photogrammetrie Kulturtechnik
IGP	Institut für Geodäsie und Photogrammetrie
SMA	Schweizerische Meteorologische Anstalt
ANETZ	Automatisches Beobachtungsnetz
PAN	Projektgruppe Automatisierung der Netze
NFP	Nationales Forschungsprogramm
EUREF	European Reference Frame
SWISSDOC	Swiss Doppler Observation Campaign
ALGEDOP	Alpine Geoid Doppler Project

Adresse der Verfasser:

U. Marti, H.-G. Kahle, B. Wirth
 Institut für Geodäsie und
 Photogrammetrie
 ETH Hönggerberg
 CH-8093 Zürich