

SWISSDOC und ALGEDOP : ein (beinahe schon) abgeschlossenes Kapitel der Satellitengeodäsie : das Jahrzehnt des Satelliten-Dopplerverfahrens in der Schweiz

Autor(en): **Müller, M.V.**

Objektyp: **Article**

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

Band (Jahr): **87 (1989)**

Heft 8

PDF erstellt am: **18.05.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-234071>

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.

SWISSDOC und ALGEDOP: Ein (beinahe schon) abgeschlossenes Kapitel der Satellitengeodäsie; das Jahrzehnt des Satelliten- Dopplerverfahrens in der Schweiz

M. V. Müller

Zwischen 1984 und 1986 war die Schweiz Schauplatz zweier bedeutender Dopplermesskampagnen: SWISSDOC und ALGEDOP. Inhalt von SWISSDOC war die Bestimmung eines Netzes von 3D-Stationskoordinaten und – unter Einbezug von Koordinaten von früheren Netzberechnungen (Landeskoordinaten, RETrig-Koordinaten) – die Ermittlung von Transformationsparametern zwischen den einzelnen Referenzsystemen. ALGEDOP beschäftigte sich mit der Geoidbestimmung aus Doppler-Höhen in Kombination mit nivellierten Höhen. In diesem Bericht werden die wichtigsten Ergebnisse dieser beiden Kampagnen zusammengefasst. Zum Schluss wird eine Brücke geschlagen zwischen dem Verfahren der Dopplermessungen an TRANSIT-Satelliten und dem heute bereits weitverbreiteten Global Positioning System GPS.

De 1984 à 1986 SWISSDOC et ALGEDOP, deux campagnes «Doppler» de grande envergure, ont eu lieu en Suisse. Le but de SWISSDOC consistait en la détermination de coordonnées géocentrique, qui comparées aux coordonnées nationales ou RETrig, permettaient de calculer des paramètres de transformation entre les différents systèmes de référence. Une détermination du géoïde par comparaison des hauteurs Doppler aux hauteurs nivellées fut réalisée dans le cadre d'ALGEDOP. Ce rapport s'est posé comme objectif de récapituler les plus importants résultats des deux campagnes et de montrer le développement qui va de la méthode Doppler sur les satellites TRANSIT au système GPS.

1. Einleitung

Die Satellitengeodäsie kann zwar erst auf eine relativ kurze Vergangenheit zurückblicken (zumindest was die praktische Anwendung betrifft), trotzdem ist es ihr gelungen, in der täglichen Praxis Fuss zu fassen. In der Schweiz sind zum Beispiel in den letzten zwei Jahren Aufgaben der Ingenieurvermessung (Tunnelnetze, Hangüberwachungen) parallel zu terrestrischen Vermessungen mit Methoden der Satellitengeodäsie gelöst worden [Cocard, Geiger 1988; Ettlin 1988; Nebiker, Walser 1988]. Ebenso hat das Bundesamt für Landestopographie – quasi als Signalwirkung für private Vermessungsunternehmen – durch den Erwerb von eigenen GPS-Empfängern und die Erstellung von Satelliten-Grundlagenetzen gezeigt, dass die An-

wendung der Satellitengeodäsie in kurzer Zeit eine tragende Rolle im Konzert der Vermessungsmethoden spielen dürfte. Ohne Leistungsausweis in Form von zu erreichenden Genauigkeiten (im Verhältnis zum Aufwand) hätte die Satellitengeodäsie diese Position nicht so schnell erreicht. Über kurze Distanzen den terrestrischen Methoden zumindest ebenbürtig, liegen die Vorteile der Satellitengeodäsie vor allem bei grösseren Entfernungen; dem Aufbau grösserer konsistenter Netze steht damit nichts mehr im Wege.

Trotz der rasanten Entwicklung wurden diese Leistungen natürlich nicht von einem Tag auf den anderen erreicht! Es bedurfte vielmehr verschiedener Zwischenschritte zum Erlangen dieses Ziels. Ein solcher Zwischenschritt stellt die Anwendung des Doppelverfahrens (unter Ausnutzung des bekannten Dopplereffekts) dar. Die Theorie der Bewegung von Himmelskörpern ist zwar schon lange bekannt (Kepler). Trotzdem war es Ende der fünfziger Jahre interessant, die Bahnen der ersten künstlichen Satelliten mit geodäti-

schen Methoden (Distanzmessungen, Richtungsmessungen) zu verfolgen und zu bestimmen. Schnell erkannte man die Möglichkeit, umgekehrt bei bekannter Bahn eines Satelliten eine unbekannte Position an einem beliebigen Punkt im «Sichtbereich» eines Satelliten zu bestimmen: Dies soll andeuten, dass damit nicht in erster Linie an die Anwendung in der Vermessung gedacht wurde; es standen vielmehr Probleme der Navigation bei See- und Luftfahrt im Vordergrund. Zudem wagte man noch nicht, an Genauigkeiten im Millimeterbereich zu denken. Schon 1958 reiften daher Pläne zur Etablierung eines Systems von Satelliten, das ausschliesslich der Navigation dienen sollte: Das US Navy Navigation Satellite System (NNSS), auch bekannt unter dem Namen TRANSIT-System. 1964 wurde der Betrieb des Systems – bis 1967 allerdings ausschliesslich für militärische Zwecke – aufgenommen. Nach der Freigabe für zivile Anwendungen «stürzten» sich die Gerätehersteller auf diesen zukunftssträchtigen Markt. In der Blütezeit des TRANSIT-Systems wurden rund zwei Dutzend verschiedene Navigationsempfänger-Typen angeboten. Für die Geodäsie – neben den Navigationsanwendungen ein (damals) praktisch verschwindend kleiner Markt – wurden immerhin von vier verschiedenen Firmen Dopplerempfänger gebaut. Damit hatte das Zeitalter der Satellitengeodäsie mit relativ handlichen Geräten begonnen. Das Institut für Geodäsie und Photogrammetrie (IGP) der ETH Zürich erwarb 1981 zwei Dopplerempfänger MX 1502 der Firma Magnavox. Einigen kleineren Messkampagnen folgten in den Jahren 1984/85 zwei grössere Dopplerkampagnen in der Schweiz: SWISSDOC (Swiss Doppler Campaign) und ALGEDOP (Alpine Geoid Doppler Project).

Ziel von SWISSDOC war das Bestimmen von dreidimensionalen kartesischen Koordinaten ausgewählter Stationen des Schweizerischen Triangulationsnetzes (vorwiegend Punkte 1. Ordnung) in einem internationalen Referenzsystem. Dabei sollten die erreichbaren Genauigkeiten untersucht werden. Endprodukt war die Bestimmung von Transformationsparametern zwischen WGS-72-Koordinaten (Dopplersystem) und Schweizerischen Projektionskoordinaten einerseits, andererseits zwischen WGS-72-Koordinaten und ED-79-Koordinaten des europäischen Triangulationsnetzes RETrig.

ALGEDOP dagegen diente der Erprobung der Methode der satellitengestützten Geoidbestimmung im Zusammenspiel mit nivellierten Höhen. Das Projekt erstreckte sich über den gesamten Alpenraum und wurde in einer beispielhaften internationalen Zusammenarbeit realisiert. Die Auswertungen des Schweizer Teils von ALGEDOP wurden am IGP durchgeführt. Die Zeit der grossen Dopplerkampagnen

in der Schweiz ist in der Zwischenzeit vorbei. GPS-Empfänger sind an die Stelle von Doppler-Geräten getreten. Die um einen Faktor Zehn genaueren und rund hundert Mal schnelleren GPS-Messungen haben im Buch der Geschichte der Satellitengeodäsie ein neues Kapitel aufgeschlagen!

Mit diesem Bericht soll noch einmal Rückschau auf das Doppler-Jahrzent in der Schweiz gehalten werden. Dabei werden die Resultate von SWISSDOC und ALGEDOP vorgestellt und diskutiert.

2. Zum Dopplerverfahren: Ein kurzer Rückblick

Das Dopplerverfahren in der Satellitengeodäsie wurde im VPK [Geiger, Kahle 1982] überblicksmässig vorgestellt.

Die physikalischen Grundlagen der Satellitengeodäsie sind schon fast 400 Jahre alt. 1609 präsentierte Johannes Kepler die ersten beiden – heute als Keplersche Gesetze bekannten – Thesen. Ohne sie kommt die Himmelsmechanik auch heute noch nicht aus. Ganz allein die Lösung des Zweikörperproblems nach Kepler reicht allerdings nicht aus, Satellitenbahnen zu bestimmen. Das anomale Gravitationsfeld der Erde, der Einfluss von Sonne, Mond und weiteren Himmelskörpern, aber auch nicht-gravitative Einflüsse (z.B. Strahlungsdruck der Sonne, Reibungseinflüsse der Atmosphäre) machen die Satellitenbahnbestimmung zu einem delikaten Problem: man kann aber davon ausgehen, dass die Bahnen mit genügender Genauigkeit bekannt sind bzw. berechnet werden können [Beutler 1982].

Sendet ein Satellit (auf seiner bekannten Bahn) ein Radiosignal von konstanter Frequenz aus, so wird ein Empfänger auf der Erde eine Frequenz empfangen, die nicht konstant ist. Ausschlaggebend ist dabei die Geschwindigkeitskomponente des Satelliten auf den Empfänger zu. Dies ist das Erscheinungsbild des Dopplereffekts, das sich folgendermassen quantifizieren lässt:

$$f = f_s \left(1 + \frac{v_s}{c} \right)$$

wobei f = empfangene Frequenz
 f_s = ausgesandte Frequenz des Satelliten
 v_s = Geschwindigkeitskomponente des Satelliten in Richtung des Empfängers
 c = Lichtgeschwindigkeit

Was misst ein Doppler-Empfänger?

Die vom Satelliten ausgestrahlte Frequenz wird vom Empfänger gemessen und mit einer im Empfänger generierten – möglichst stabilen – Referenzfrequenz verglichen. Damit die Differenz $f_R - f_E$ zwi-

schen der Referenzfrequenz f_R und der empfangenen Frequenz f_E nicht negativ wird, ist die Sendefrequenz etwas kleiner als die Referenzfrequenz gewählt worden. Die Frequenzdifferenz $f_R - f_E$ wird über eine bestimmte Zeitspanne integriert und liefert damit ein Mass für die Abstandsänderungen vom Satelliten zum Beobachter. Messgrösse sind die sogenannten Dopplercounts N_i :

$$N_i = \int_{T_i}^{T_{i+1}} (f_R - f_E) dt$$

wobei

N_i = Dopplercount zwischen den Zeitpunkten T_i und T_{i+1}

Es ist nun einerseits die Satellitenposition zu jedem Zeitpunkt bekannt, andererseits kann mit Hilfe des Dopplercounts zusätzlich die Abstandsdifferenz zwischen Satellit und Beobachtungsstandort zu zwei Zeitpunkten bestimmt werden. Da Punkte, deren Abstand zu zwei bekannten Punkten eine feste Streckendifferenz aufweisen, auf einem Hyperboloid liegen, können für verschiedene Zeitpunkte (bzw. Dopplercounts) Hyperboloide bestimmt werden, die sich alle an einem Punkt schneiden sollten: nämlich an der gesuchten Stelle, wo die Antenne unseres Empfängers steht. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Radiowellen in der Atmosphäre ist nun nicht einfach gleich der Lichtgeschwindigkeit: Ionosphäre und Troposphäre üben ihren bremsenden Einfluss aus. Während die Korrektur infolge der Ionosphäre durch Aussenden und Empfangen zweier Frequenzen (im Falle der Dopplersatelliten 150 und 400 MHz) rechnerisch eliminiert werden kann (frequenz-

abhängiges Verhalten!), ist man bei der Korrektur des Troposphäreneinflusses auf Modelle der Atmosphäre angewiesen, die von gemessener Temperatur, Druck und Feuchte auf der Station ausgehen.

Um dieses Verfahren operationell anzuwenden, wurde schon 1958 damit begonnen, das US Navy Navigation Satellite System (NNSS) oder TRANSIT-System zu entwickeln. 61 kg schwere Satelliten bewegen sich auf beinahe kreisförmigen Polbahnen in einer Höhe von rund 1075 km. 107 Minuten dauert ein Umlauf. Da sich die Erde unter dem Satellit wegdreht, ist es zwar möglich, drei oder vier aufeinanderfolgende Durchgänge (Dauer rund 20 Minuten) eines Satelliten zu verfolgen, anschliessend wird er aber für einige Stunden nicht sichtbar sein. Während der beiden grossen Dopplerkampagnen in der Schweiz (SWISSDOC und ALGEDOP) in den Jahren 1984 bis 1986 waren zwischen vier und sieben TRANSIT-Satelliten operationell; heute (anfangs 1989) sind ebenfalls sieben Satelliten im Betrieb. Es ist geplant, das TRANSIT-System bis Mitte der neunziger Jahre zu warten. Damit möchte man allen Benützern die Möglichkeit geben, auf das Nachfolgesystem GPS umzusteigen.

Woher kennt man die Bahnen eines Satelliten? Die TRANSIT-Satelliten werden von verschiedenen Bodenstationen aus verfolgt; es werden Bahnen für die nächsten Stunden präzisiert und dem Satelliten «mitgeteilt». Der Sendefrequenzphasenmoduliert aufgeprägt stehen dem Benutzer des TRANSIT-Systems diese Daten als sogenannte *Broadcast Ephemeriden* (BE) «real time» zur Verfügung. Sollte die Genauigkeit dieser Bahnen (~25 m) nicht ausreichen, können die *präzisen Ephemeriden* (PE) angefordert werden; dies allerdings erst Wochen später!



Abb. 1: Karte der SWISSDOC-Stationen.

3. Dopplerkampagnen in der Schweiz

3.1 SWISSDOC

3.1.1 Ziel und Zweck von SWISSDOC

Das Triangulationsnetz 1. Ordnung bildet die Grundlage der Landesvermessung. Das Netz der Schweiz baut vor allem auf Richtungs- und Höhenwinkelmessungen auf. Der Massstab wurde durch das Übertragen von mit grossem Aufwand vermessenen Basen (Aarburg, Giubiasco, Weinfelden) ins Netz eingeführt (zur Neuausgleichung des Basisvergrößerungsnetzes Giubiasco siehe z.B. [Wunderlin 1981]). Operationelle Distanzmessgeräte sind erst seit wenigen Jahrzehnten auf dem Markt. Die Koordinaten der Triangulationspunkte standen längst fest. Nachmessungen haben allerdings (spürbare) Verzerrungen aufgedeckt. Umfangreiche Neuausgleichungen der alten Messungen im Rahmen der Aktivitäten für RETrig (Réseau Européen de Triangulation) haben dies ebenfalls bestätigt [Wunderlin 1980]. Es ist zwar zu vermuten, dass die Koordinaten von Triangulationspunkten nicht über Jahrzehnte fest bleiben (dies haben geodynamische Untersuchungen über mehrere Jahre im Gotthardgebiet mit neuesten Messungen – u.a. mit GPS – im Herbst 1988 deutlich gezeigt), es wäre aber wünschenswert, quantitative Aussagen über Verzerrungen machen zu können.

Ziel von SWISSDOC war es deshalb, ein homogenes Netz von Triangulationspunkten (i.a. 1. Ordnung) nachzumessen – eingebettet in ein internationales Referenzsystem. Ebenfalls Gegenstand des Projekts waren Untersuchungen zu erreichbaren Genauigkeiten. Nicht zuletzt sollte SWISSDOC auch Transformationsparameter zwischen dem Doppler-System (WGS-72) und dem Schweizer Koordinatensystem bzw. dem RETrig-System (ED-79) liefern.

3.1.2 Netzanlage, Durchführung, Beteiligte Institutionen

Die Messungen für SWISSDOC wurden in zwei Kampagnen à zehn Tage aufgeteilt (Abb. 1). Vier Stationen (Zimmerwald, Feldberg [BRD], Pfänder [A], Monte Generoso) wurden in beiden Beobachtungsphasen besetzt, was eine Verknüpfung der beiden Kampagnen ermöglichte. Zudem wurden die Stationen Zimmerwald, Feldberg und Pfänder bereits in früheren internationalen Dopplerkampagnen beobachtet. Die übrigen SWISSDOC-Stationen wurden auf Triangulationspunkten (vorwiegend 1. Ordnung) der Schweizerischen Landesvermessung (gleichzeitig RETrig-Punkte) eingerichtet. Vier hochalpine Stationen konnten nur durch Helikopterflüge besetzt werden. Über Netzanlage, Durchführung und Mitwirkende berichtet [Wiget, Geiger 1985].

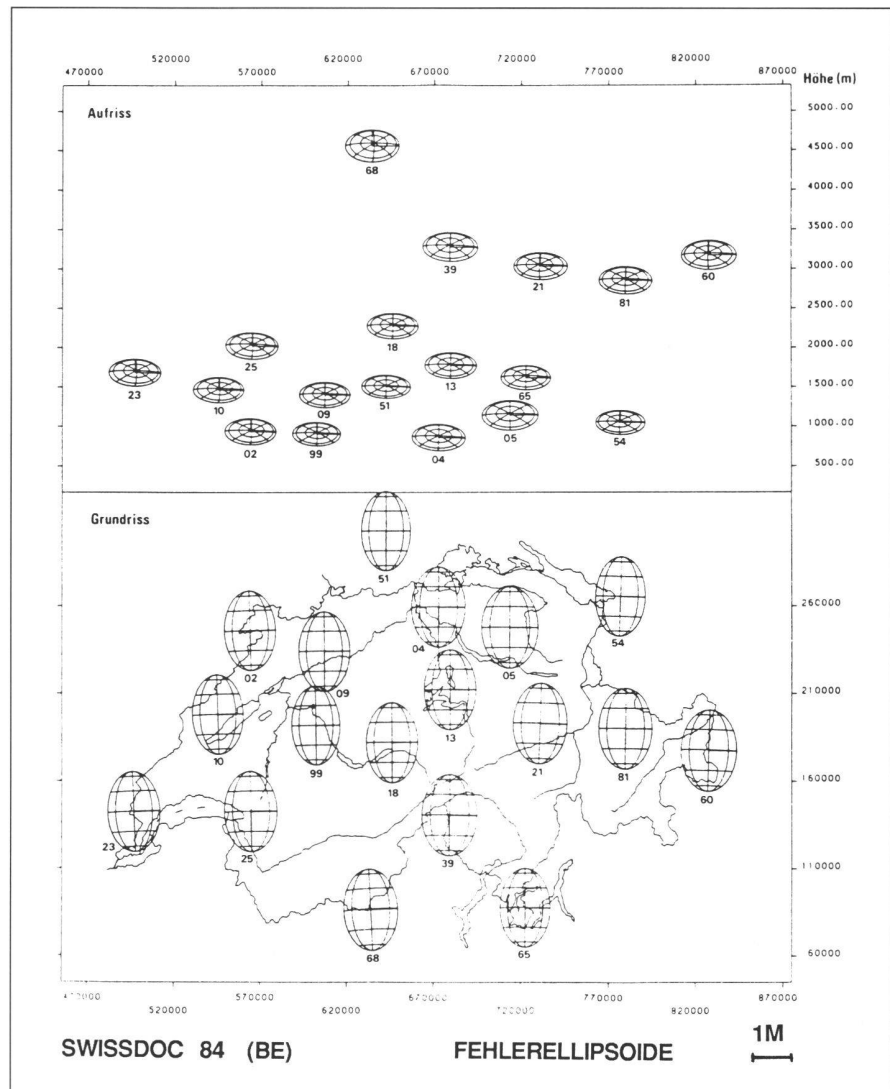


Abb. 2: Absolute Fehlerellipsoide der SWISSDOC-(Broadcast-Ephemeriden)-Lösung.

Zwölf Dopplerempfänger MX 1502 standen für die beiden Kampagnen zur Verfügung. Diese hätten eigentlich ausreichen müssen, die 20 SWISSDOC-Stationen zu beobachten. Leider spielte das Wetter in der ersten Teilkampagne nicht mit: Am 1. August 1984 wurden zwei Empfänger (auf Vorab und Mompiccio) durch Blitzschlag zerstört. Dies hatte zur Folge, dass in der zweiten Kampagne die Punkte Les Voirons und P. Tambo nicht beobachtet werden konnten. Für die Auswertung der SWISSDOC-Kampagne verblieben daher 18 Stationen.

Folgende Institutionen waren an SWISSDOC mit Geräten, Personal oder anderen Dienstleistungen beteiligt:

- Alfred-Wegener-Institut für Polarforschung, Bremerhaven (2 Empfänger)
- Bundesamt für Landestopographie, Bern (Bestimmung von Exzentren)
- Ecole Polytechnique Fédérale, Lausanne

- Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich (2)
- Hochschule der Bundeswehr (heute: Universität der Bundeswehr), München (2)
- Institut für Weltraumforschung der ÖAW, Graz
- Istituto Geografico Militare, Firenze (2)
- Schweizerische Meteorologische Anstalt, Zürich
- Technische Universität, Berlin (1)
- Università di Trieste
- Universität Bern
- Universität Bonn (1)
- Universität Stuttgart (1)
- Wild Heerbrugg AG (1).

Es sei an dieser Stelle nochmals allen Beteiligten für ihren Einsatz gedacht.

3.1.3 Resultate

Zum Zwecke der Kalibrierung wurden alle in SWISSDOC und ALGEDOP 1984 ein-

gesetzten Dopplerempfänger während sieben Tagen (vom 9.–16. Juli 1984) gemeinsam auf dem Dach des HIL-Gebäudes der ETH-Hönggerberg betrieben: Die Kalibrierungsmessungen boten die Gelegenheit, das Material auf Vollständigkeit und Funktionstüchtigkeit hin zu überprüfen. Zudem wurde durch den Betrieb der Empfänger die Oszillatoren stabilisiert, ein Vorteil, der für die Kalibration selber noch nicht zutraf.

Ausgehend von der Tatsache, dass alle Empfänger simultan am gleichen Ort betrieben wurden und sich somit Bahnfehler und ionosphärische wie troposphärische Refraktionseinflüsse auf alle Geräte gleich auswirken, sind die Resultate, wie sie in [Wiget, Geiger 1986] beschrieben wurden, nicht befriedigend. Für die Auswertung von SWISSDOC und ALGEDOP wurden daher keine Antennenoffsets berücksichtigt. Es zeigte sich dabei auch, dass Genauigkeitsannahmen für Doppler-Koordinaten von 0,3 m bis 0,5 m realistisch sind. Obwohl SWISSDOC in zwei Teilkampagnen aufgeteilt war, konnten dank den vier Verknüpfungspunkten (Zimmerwald, Monte Generoso, Feldberg und Pfänder) alle 18 Stationen in einem Guss ausgewertet werden. Zu diesem Zweck musste das auf maximal 15 Punkte ausgelegte GEODOP-Programmpaket [Kouba, Boal 1976] in seinen Dimensionen erweitert werden. 318 Satellitendurchgänge wurden insgesamt beobachtet. 44 davon wurden durch GEODOP verworfen (zu geringe Elevation, Überschreiten von vorgegebenen Toleranzgrenzen). Für die Lösung mit präzisen Ephemeriden – die jeweils nur für zwei Satelliten der Öffentlichkeit bekanntgegeben werden – lagen 155 Satellitendurchgänge vor, sechs davon wurden verworfen. Während, wie bereits erwähnt, Ionosphäreinflüsse durch Messen auf zwei Frequenzen rechnerisch eliminiert werden können, stehen in GEODOP verschiedene Modelle zur Reduktion des Troposphäreinflusses zu Verfügung. Mit den beiden meist gebräuchlichen Modellen von Saastamoinen und Hopfield wurden verschiedene Varianten berechnet. Dabei konnte eine (geringe) systematische Verschiebung der absoluten Lage beobachtet werden, welche durch Asymmetrien der mittleren Wetterlage – die durch die verwendeten Troposphärenmodelle nicht erfasst werden können – hervorgerufen werden. Der Einfluss von richtungsabhängigen Fehlern bei Satellitenmessungen wird in [Geiger 1987] beschrieben. Stärker als in der Lage wirkt sich die Wahl des Troposphärenmodells erwartungsgemäss in der Höhe aus. Stellvertretend für die Resultate – man findet eine ausführliche Zusammenstellung in [Wiget, Geiger 1986] – sind hier für die Lösung mit Broadcast-Ephemeriden absolute Fehlerellipsoide (Abb. 2) und relative Fehlerellipsoide bezüglich der zentralen

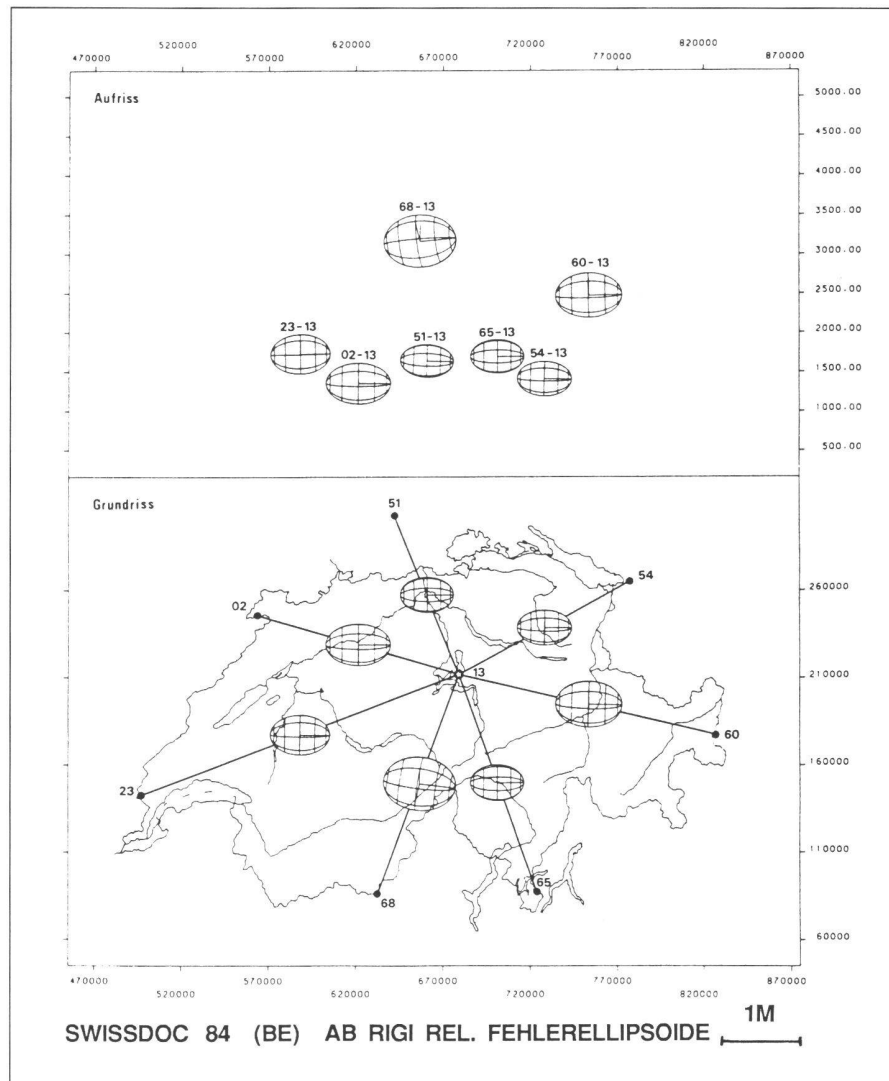


Abb. 3: Relative Fehlerellipsoide der SWISSDOC-(Broadcast-Ephemeriden)-Lösung (ausgewählte Randpunkte gegenüber Punkt Rigi).

SWISSDOC-Station Rigi (Abb. 3) aufgeführt.

Ein Hauptziel von SWISSDOC war die Bestimmung von Transformationsparametern zwischen Doppler-Koordinaten und Landeskoordinaten bzw. ED-79-Koordinaten (RETrig). Dies geschah durch eine

räumliche Koordinateninformation mit dem Programm ATRA des IGP [Schmid, Heggli 1978].

Der Parametersatz für die Überführung von Landeskoordinaten in Doppler-Koordinaten (Broadcast-Ephemeriden, Saastamoinen-Modell) lautet:

$$\begin{array}{lll} \text{Translation: } \Delta X = 670,507 \text{ m} & \Delta Y = 35,827 \text{ m} & \Delta Z = 369,301 \text{ m} \\ \text{Rotation: } \omega_x = -0,176^{\circ} & \omega_y = 2,280^{\circ} & \omega_z = 5,530^{\circ} \\ \text{Massstab: } m = 4,64 \cdot 10^{-6} \end{array}$$

Die mittleren Klaffen nach der Transformation betragen 40 cm (Abb. 4).

Es ist aber nicht möglich, die «Schuld» an diesen Klaffen eindeutig den Landeskoordinaten oder den Doppler-Koordinaten zuzuordnen: Zwei Gründe sprechen aller-

dings dafür, dass die Doppler-Koordinaten ein homogeneres Netz bilden:

– Einerseits der Parametersatz für die Transformation von RETrig-Koordinaten (ED-79) ins Doppler-System mit folgenden Werten:

$$\begin{array}{lll} \text{Translation: } \Delta X = -69,980 \text{ m} & \Delta Y = -72,659 \text{ m} & \Delta Z = -133,817 \text{ m} \\ \text{Rotation: } \omega_x = -2,250^{\circ} & \omega_y = 2,042^{\circ} & \omega_z = 3,279^{\circ} \\ \text{Massstab: } m = 0,59 \cdot 10^{-6} \end{array}$$

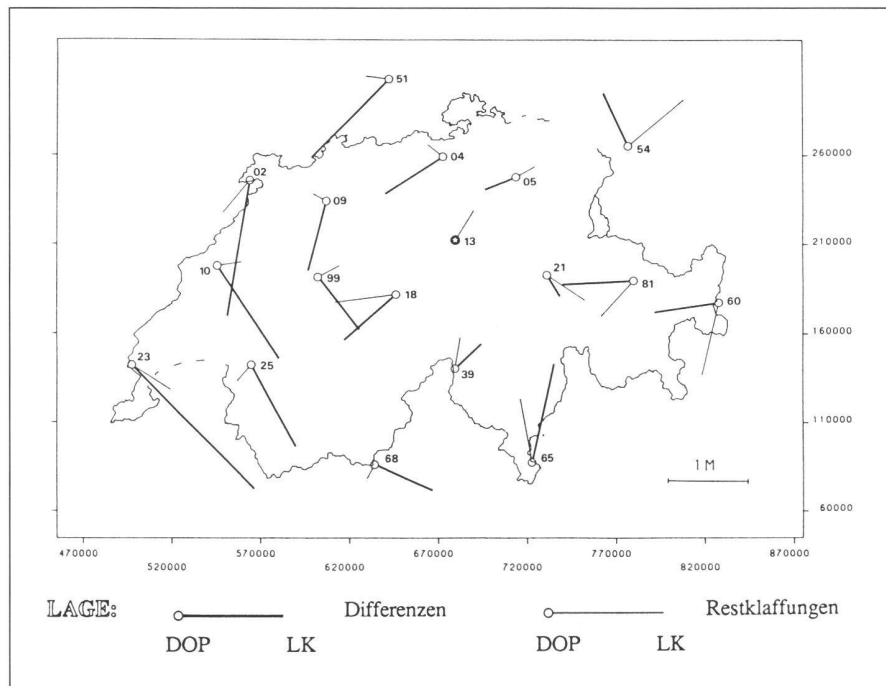


Abb. 4: Differenzen (vor) und Restklaffen (nach) der Transformation Landeskoordinaten $\leftrightarrow$ Doppler-Broadcast-Ephemeriden-Lösung für die Lage.

Das RETrig-Netz – entstanden durch eine gesamthafte Ausgleichung der terrestrischen Messungen für das Triangulationsnetz 1. Ordnung der Schweiz – ist erwiesenermaßen homogener als das gebräuchliche Landeskoordinatenetz. Dies äussert sich auch in den etwas kleineren Klaffen nach der räumlichen Koordinatentransformation (~ 30 cm).

- Andererseits passen die Dopplerlösungen mit Broadcast-Ephemeriden und präzisen Ephemeriden (mittlere Klaffen rund 15 cm) recht gut aufeinander.

3.2 ALGEDOP

3.2.1 Ziel und Zweck von ALGEDOP

Die Ziele und theoretischen Grundlagen von ALGEDOP wurden in [Geiger, Wiget 1986] beschrieben.

Die Idee der ALGEDOP-Kampagne stammt von Prof. A. Marussi vom Istituto di Geodesia e Geofisica der Universität Triest. Im Jahre 1980 regte er die Bestimmung des Geoids im Alpen- und Mittelmeerraum mit Hilfe von Dopplermessungen an. Die Auswertung von Dopplerdaten liefert kartesische, geozentrische Koordinaten, die – unter Zugrundelegung

eines entsprechenden Ellipsoids – in ellipsoidische Koordinaten (geografische Länge, Breite und ellipsoidische Höhe h) umgewandelt werden können. Auf der anderen Seite liegen aus dem Landesnivelement Gebrauchshöhen vor, die etwa den geoidischen Höhen H entsprechen. Die Differenz $h-H$ liefert in guter Näherung die gesuchte Zielgrösse N (Geoidundulation). Dieser Sachverhalt wird durch Abb. 5 illustriert.

3.2.2 Netzanlage, Durchführung, Beteiligte Institutionen

Bereits 1980 wurden erste Messungen für ALGEDOP auf dem 13°-Ost-Meridian zwischen Wettzell (BRD) und Triest (I) unter Mitwirkung von Instituten aus der Bundesrepublik Deutschland, Italien, Österreich und der Schweiz durchgeführt. Die ermutigenden Resultate führten in den folgenden Jahren zu weiteren Messkampagnen. In der Schweiz wurden die Hauptmessungen in den Jahren 1984 und 1985 durchgeführt [Wiget, Geiger 1985]. 1986 wurden die ALGEDOP-Kampagnen mit dem Messen von drei Stationen (die in früheren Kampagnen ausgefallen waren) abgeschlossen. Für die Auswahl der Punkte galten zwei Kriterien: Einerseits sollten sie möglichst auf einem regelmässigen Gitter liegen, andererseits sollte der Anschluss an bestehende Nivellementslinien gewährleistet sein. Daraus resultierte die folgende Netzanlage (Abb. 6).

Folgende Institutionen – es sei auch ihnen an dieser Stelle nochmals gedankt – wirkten bei den ALGEDOP-Messungen mit:

- Alfred-Wegener-Institut für Polarforschung, Bremerhaven (BRD)
- Bundesamt für Landestopographie, Bern
- Centre d'Etudes et de Recherches Géodynamiques et Astronomiques, Grasse (F)
- Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich
- Hochschule der Bundeswehr (heute: Universität der Bundeswehr), München (BRD)
- Institut für Angewandte Geodäsie, Frankfurt (BRD)
- Institut für Weltraumforschung der ÖAW, Graz (A)
- Institut Géographique National, Saint Mandé (F)
- Istituto Geografico Militare, Firenze (I)
- Landbouwhogeschool Wageningen (NL)
- Lichtklimatisches Observatorium, Arosa
- Schweizerische Meteorologische Anstalt, Zürich
- Technische Universität Berlin (BRD)
- Università di Trieste (I)

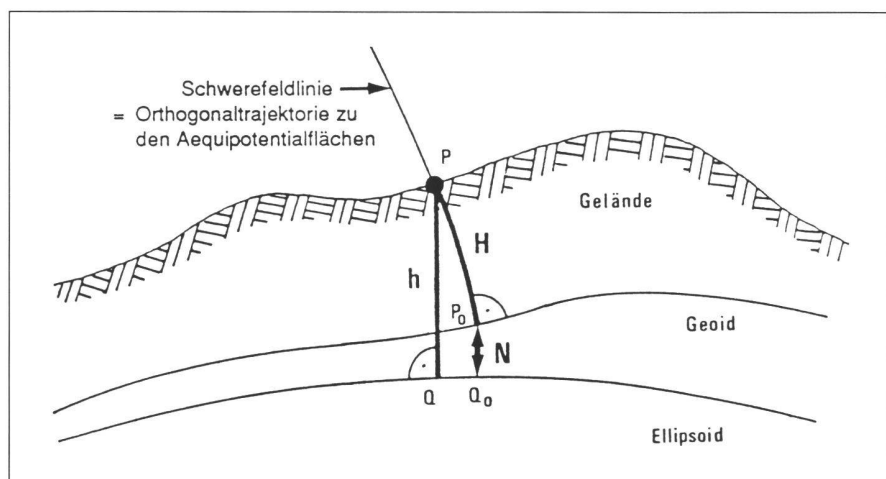


Abb. 5: Illustration von $N = h - H$.

- Universität Bonn (BRD)
- Universität Stuttgart (BRD)
- U.S. Department of Defense, Washington (USA)
- Wild Heerbrugg.

3.2.3 Resultate

Insgesamt verfügten wir über 15 auswertbare ALGEDOP-Stationen. Da es aus personellen Gründen nicht möglich war, «rund um die Uhr» meteorologische Daten für die Korrektur des Troposphäreninflusses zu erheben, wurden für alle ALGEDOP-Punkte mit Hilfe des Stundendatensatzes der automatischen Wetterbeobachtungsstationen (ANETZ) der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt (SMA) Temperatur, Druck und relative Luftfeuchtigkeit extrapoliert. Die Bestimmung von Gebrauchshöhen (teils nivellistisch, teils trigonometrisch) der ALGEDOP-Punkte übernahm das Bundesamt für Landestopographie (L+T).

In den vier Teilkampagnen (1984: 17.–26. Juli; 1985 I: 5.–12. Juli; 1985 II: 15.–22. Juli; 1986: 16.–23. Sept.) wurden insgesamt 572 Durchgänge beobachtet (präzise Ephemeriden: 226 Durchgänge). Davon wurden 17 (8) verworfen. Die ausgewiesene innere Genauigkeit lag – mit Unterschieden in den einzelnen Teilkampagnen – zwischen 0,07 m und 0,34 m. Das resultierende Geoid (im WGS-72-System) zeigt Abb. 7.

Die ellipsoidischen Höhen aus der Dopplerrücklösung sind mit Fehlern zwischen 30 und 50 cm behaftet. Zudem sind bei der Verknüpfung mit nur einer Referenzstation (Arosa) Verkippungen zwischen den Lösungen der einzelnen Teilkampagnen nicht auszuschließen. Es schien uns deshalb angezeigt, für die wesentlich homogenere SWISSDOC-Lösung – obwohl die Gebrauchshöhen, weil nicht überall direkt ans Nivellement angeschlossen, etwas ungenauer einzustufen sind – ebenfalls ein Geoid zu rechnen. Das SWISSDOC-Geoid (diesmal im Schweizer Datum) zeigt Abb. 8. Vergleiche mit dem astrogeodätischen Geoid von Elmiger und Gurtner [Gurtner 1978] können durchaus befriedigen.

4. Generationenwechsel in der Satellitengeodäsie

Zwar sind die Dopplerempfänger des IGP noch nicht dem «Alteisen» übergeben worden: Zur Zeit (Februar 1989) befindet sich z.B. ein Gerät für Langzeitmessungen in der Antarktis. Auch in der Schweiz wurden die Empfänger noch gelegentlich eingesetzt. Vor allem für Untersuchungen des Ionosphäreninflusses konnten durch das Messen auf zwei Frequenzen – die GPS-Empfänger des IGP werden zur Zeit auf zwei Frequenzen umgerüstet – interes-

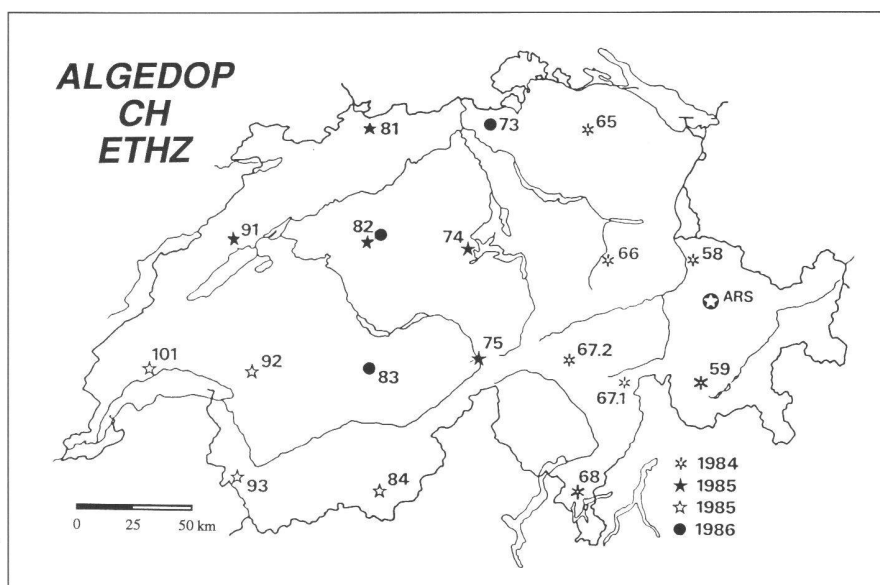


Abb. 6: ALGEDOP-Stationen in der Schweiz.

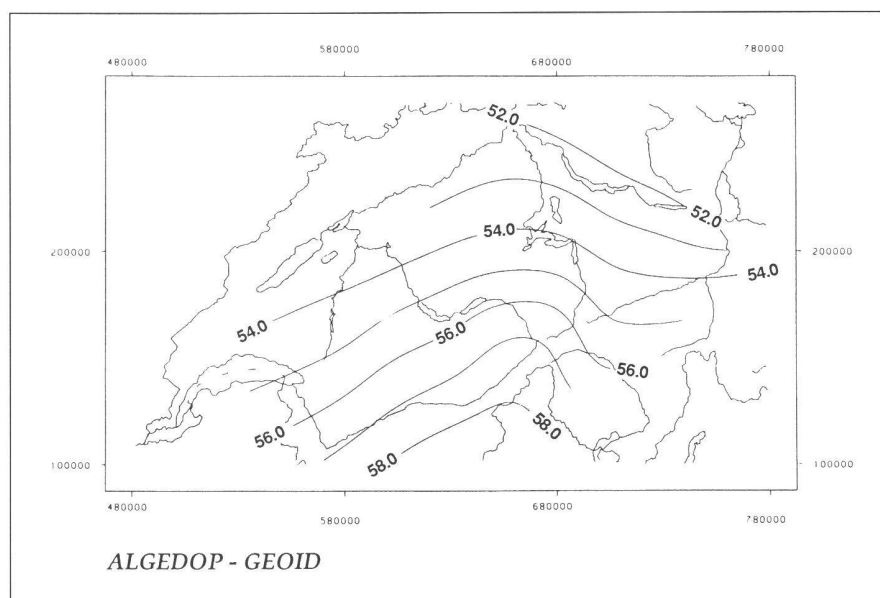


Abb. 7: ALGEDOP-Geoid mit Broadcast-Ephemeriden (WGS-72).

sante Untersuchungen durchgeführt werden [Walser 1988].

Die Zukunft weist aber eindeutig in Richtung GPS: In relativ kurzer Zeit erreichbare Genauigkeiten (bald während 24 Stunden am Tag einsetzbar) veranlassen immer mehr auch private Vermessungsunternehmen in der Schweiz zu Investitionen in GPS-Empfänger.

Nachfolgekampagnen für SWISSDOC und ALGEDOP wurden bereits durchgeführt oder werden demnächst realisiert. Transformationsparameter zwischen Landeskoordinaten und dem (gegenwärtig aktuellen) WGS-84-Referenzsystem wurden in etwas kleinerem Rahmen mit der GRANIT-Kampagne 1987 bestimmt. Eine lokale Geoidbestimmung (im Raum Zürich–

Rapperswil–Zug) erfolgte im Frühling 1988 im Rahmen eines Vertiefungsblocks für Vermessungsingenieurstudierenden der ETH [Dähler, Ettlin, Graf, Oetiker, Sturm 1988]. Im Sommer 1989 wird (zum Teil auf ALGEDOP-Stationen) ein grösserer Versuch (ca. 40 Punkte) über die ganze Schweiz gestartet.

Obwohl die GPS-Empfänger des IGP bis Ende 1988 nur auf einer Frequenz operierten, hat sich gezeigt, dass GPS konsistente geodätische Netze zu liefern vermag. Ein Versuch über mittlere Entfernungen (bis 70 km) im Herbst 1988 in einem Netz zwischen Olten und Schaffhausen hat – auch ohne Berücksichtigung der Stationsmeteo(!) – eine ausgezeichnete Repetierbarkeit gezeigt. Nach einer räumli-

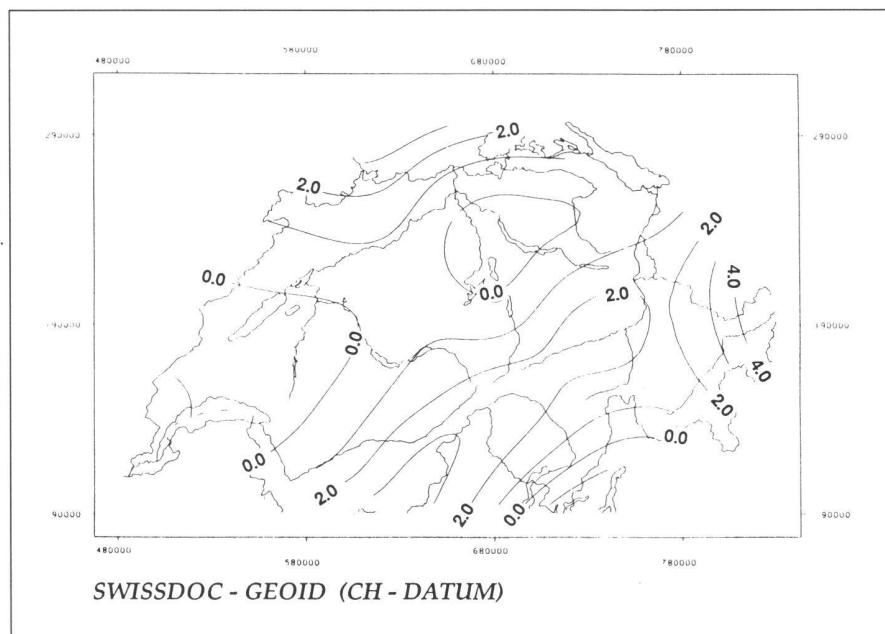


Abb. 8: SWISSDOC-Geoid im Schweizer-Datum.

chen Koordinatentransformation mit dem Programm ATRA der einzelnen Tageslösungen aufeinander verblieben Klaffen von im Mittel unter 1 cm.

Obwohl in der Schweiz für Vermessungskampagnen keine Dopplerempfänger mehr eingesetzt werden, bedeuten die Erfahrungen, die mit ihnen gesammelt werden konnten, einen wichtigen Schritt vorwärts für die Anwendung der Satellitengeodäsie in der täglichen Vermessungspraxis.

Da wir in diesem Jahr die satellitengestützte Geoidbestimmung mit GPS fortsetzen, verzichten wir an dieser Stelle auf eine ausführliche Beschreibung aller Auswertungsschritte mit dem TRANSIT-System. Hiefür gibt es zusätzliche Berichte des IGP. Über die GPS-Messungen werden wir zu gegebener Zeit berichten.

Abkürzungen

ALGEDOP	Alpine Geoid Doppler Project
BE	Broadcast Ephemerides
ED	Europäisches Datum
ETH (ETHZ)	Eidgenössische Technische Hochschule (Zürich)
GPS	Global Positioning System
IGP	Institut für Geodäsie und Photogrammetrie
NNSS	US Navy Navigation Satellite System

ÖAW	Österreichische Akademie der Wissenschaften
PE	Precise Ephemerides
RETrig	Réseau Européen de Triangulation
SGK	Schweizerische Geodätische Kommission
SMA	Schweizerische Meteorologische Anstalt
SWISSDOC	Swiss Doppler Campaign
VPK	Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik
WGS	World Geodetic System

Literatur:

- Beutler, G. (1982): Lösung von Parameterbestimmungsproblemen in Himmelsmechanik und Satellitengeodäsie mit modernen Hilfsmitteln. Astronomisch-geodätische Arbeiten in der Schweiz. Herausgeber: Schweizerische Geodätische Kommission (SGK), Band 34.
- Coccard, M., Geiger, A. (1988): Tunnel «Vue des Alpes». Technischer Bericht zuhanden des zuständigen Vermessungsbüros.
- Dähler, A., Ettlin, F., Graf A., Oetiker, M., Sturm, M. (1988): Geoidbestimmung mit GPS. Bericht zu Vertiefungsblock in Geodäsie. ETH-Zürich.
- Ettlin, F. (1988): Auswertung und Untersuchung des GPS-Basisnetzes des Vereinatunnels. Diplomarbeit am IGP in Höherer Geodäsie.

Geiger, A., Kahle, H.-G. (1982): Zum Dopplerverfahren in der Satellitengeodäsie: Ein Überblick. VPK 6/82.

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

Geiger, A. (1987): Einfluss von richtungsabhängigen Fehlern bei Satelliten-Messungen. IGP-Bericht Nr. 130.

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

Gurtner, W. (1978): Das Geoid in der Schweiz. IGP-Mitteilungen Nr. 20.

Kouba, J., Boal, J.D. (1976): Program GEODOP. Manual Series. Surveys and Mapping Branch. Department of Energy, Mines and Resources Canada, Ottawa.

Nebiker, St., Walser F. (1988): GPS-Messungen im Rutschgebiet Braunwald (GL). IGP-Bericht Nr. 143.

Schmid, H. H., Heggli, S. (1978): Räumliche Koordinatentransformation. IGP-Mitteilungen Nr. 23.

Walser, F. (1988): Ionosphäreneinfluss bei GPS-Messungen. IGP-Bericht Nr. 147.

Wiget, A., Geiger, A. (1985): Schweizerische Doppler-Messkampagne – SWISSDOC 84 –: Anwendung des U.S. Satelliten-Navigationssystems TRANSIT in der Schweiz. Teil I: Messungen und Stationsprotokolle. IGP-Bericht Nr. 99.

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

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

Wiget, A., Geiger, A. (1986): Schweizerische Dopplermesskampagne – SWISSDOC 84 –: Anwendung des U.S. Satelliten-Navigationssystems TRANSIT in der Schweiz. Teil II: Auswertung und Ergebnisse. IGP-Bericht Nr. 113.

Wunderlin, N. (1980): RETrig: ED 79. Bericht an die Schweizerische Geodätische Kommission.

Wunderlin, N. (1981): Die Neuausgleichung des Vergrößerungsnetzes der Basis Giubiasco. IGP-Bericht Nr. 49.

Adresse des Verfassers:

Max V. Müller
Institut für Geodäsie
und Photogrammetrie
ETH-Hönggerberg, CH-8093 Zürich