

Die geodätische Landesvermessung in der Schweiz, heute und morgen

H. Chablais, E. Gubler, D. Schneider, A. Wiget

Ein runder Geburtstag ist ein beliebter Anlass für eine Standortbestimmung. Nach einem kurzen geschichtlichen Rückblick wird der heutige Stand der geodätischen Landesvermessung beschrieben, und es werden Vorstellungen entwickelt, wie die Landesvermessung der Zukunft aussehen könnte. Dabei ist von den erwarteten Anforderungen auszugehen und die technische Entwicklung abzuschätzen.

Un jubilé est l'occasion souhaitée de faire le point. Après un bref aperçu historique, l'état actuel de la mensuration géodésique nationale est décrit et quelques idées de ce qu'elle pourrait être à l'avenir sont présentées. A cet effet on ne peut que présumer les exigences futures et estimer les développements techniques.

1. Einleitung

Vor 150 Jahren beschloss der damalige Oberstquartiermeister der Armee, Guillaume-Henri Dufour, in seinen Arbeitsräumen in Genf ein Eidgenössisches Topographisches Büro einzurichten, aus dem später das Bundesamt für Landestopographie (L+T) hervorging. Ein solches Jubiläum sollte Anlass sein für eine Standortbestimmung. Dabei ist zu beachten, dass die Entwicklung der Landesvermessung von Wolf [36] und Zölly [39, 40] schon sehr ausführlich beschrieben wurde. Zudem schildert Jeanrichard [19] den Werdegang der Landesvermessung. Unser Aufsatz soll also mehr eine Standortbestimmung und eine Absichtserklärung darstellen. Auch dazu gibt es bereits Publikationen wie etwa von Matthias [21].

Primäre Aufgabe des Eidg. Topographischen Büros war, ein einheitliches Kartenwerk über die ganze Schweiz zu erstellen. Dies setzte auch ein genügend genaues Fixpunktnetz für die ganze Schweiz und eine einheitliche Abbildung der gekrümmten Erdoberfläche in die Projektionsebene voraus. Schon in den Jahren 1832 bis 1839 liess Dufour deshalb von seinen Mitarbeitern die «Triangulation primordiale» messen. Es ist zu beachten, dass zu der Zeit die Triangulationspunkte (TP) im Alpenraum nur schwer und mit grossen körperlichen Strapazen zu erreichen waren. Von diesem ersten landesweiten Netz war es ein weiter Weg bis zu den heutigen Fixpunktnetzen.

Vor kurzem konnte die Schweizerische Geodätische Kommission (SGK) ihr 125jähriges Jubiläum feiern. Sie wurde 1861 gegründet, um die mehr wissenschaftlichen Aufgaben zu übernehmen, die mit der europäischen Gradmessung bevorstanden. Unter ihrer Leitung entstanden von 1862 bis 1891 der schweizerische Anteil der Gradmessungs-Triangulation, 1880/81 die Basismessungen von Aar-

berg, Weinfelden und Bellinzona und deren Anschlussnetze. Sie liess von 1864 bis 1891 auch das erste landesweite Nivellement, das «Nivellement de précision» (NDP), messen. Später folgten weitere Aufgaben. Über die Ergebnisse dieser Arbeiten wurde laufend berichtet [33]. In der Kommission sind alle interessierten Institute der Hochschulen, die Industrie und die L+T vertreten, womit eine enge Zusammenarbeit zwischen der wissenschaftlichen Geodäsie und der Landesvermessung sichergestellt ist.

2. Entstehung der heutigen Landesvermessung

2.1 Grundlagen

Zu den wesentlichen Fundamenten einer Landesvermessung gehört die Definition der verwendeten Bezugssysteme. Klassisch wird dabei ein bestimmtes Bezugsellipsoid durch die grosse Halbachse a und die Abplattung f bestimmt. Seine lokale Lagerung im Fundamentalepunkt gegenüber dem Geoid ist durch die Lotabweichungskoeffizienten ξ_0 und η_0 und die Geoidundulation N_0 festgelegt. Die erwähnten fünf Grössen werden als «Datum» der Landesvermessung bezeichnet. Die Datumparameter werden für nationale Zwecke so ausgewählt, dass sich das Bezugsellipsoid dem Geoid innerhalb des Landes möglichst gut anschmiegt. Damit können die Geoidundulationen und die Lotabweichungen in engen Grenzen gehalten werden. Für viele Anwendungen kann dann die Abweichung zwischen Geoid und Ellipsoid vernachlässigt werden. Für die praktische Benützung der Fixpunktnetze, für ihre Verdichtung und für die Bedürfnisse der Kartographie und Katastervermessung ist zudem eine Kartenprojektion und damit ein ebenes, rechtwinkliges Landeskoordinatensystem einzuführen.

Auch bei der Erstellung der Schweizerischen Landesvermessung war die Definition der Bezugssysteme eine wichtige Entscheidung. Nachdem man in den neunziger Jahren des letzten Jahrhunderts das Bedürfnis nach neuen geodätischen Grundlagen für die Anforderungen der Kartographie, des Kataster- und des Forstwesens erkannt hatte, wurden 1901 grundlegende Studien für ein neues Bezugssystem in Angriff genommen. Zu jener Zeit erfolgten administrative und personelle Änderungen im Zusammenhang mit der Umwandlung des Eidg. Topographischen Büros in die selbständige Abteilung für Landestopographie des Eidg. Militärdepartements. Im Auftrag ihres neuen Direktors, L. Held, schufen Hilfiker und Rosenmund mit ihren 1902 [18] bzw. 1903 [29] publizierten Arbeiten die notwendigen Grundlagen für das Höhensystem und das Schweizerische Projektionssystem.

Als Bezugsellipsoid wurde das Ellipsoid von Bessel (1841) mit der grossen Halbachse: $a = 6\,377\,397,155$ m und der Abplattung: $f = 1/299,15$ angenommen. Wie zu jener Zeit üblich, wurde mit der Festlegung der astronomischen Länge und Breite im Fundamentalepunkt (alte Sternwarte Bern) die Lagerung des Ellipsoids mit $\xi_0 = \eta_0 = 0$ implizit festgelegt. Eine explizite Definition der Geoidhöhe im Fundamentalepunkt war damals nicht erfolgt. Der Wert dieses Datumparameters wurde erst 1975 mit dem Geoidmodell von Elmiger [8] indirekt eingeführt und von Gurtner 1978 [14] übernommen. Dabei wurde die Geoidhöhe im Schnittpunkt des Geoidprofils im Meridian vom Gotthard mit demjenigen im Parallel von Zürich, bei Schwerzenbach, mit dem Wert $N_0 = 0$ eingeführt.

Als Ausgangspunkt für das Schweizerische Höhensystem wurde nach Vergleichen mit den Höhensystemen der Nachbarländer der neue Horizont RPN 373,6 m festgelegt, der auch gut mit der Höhe über dem Mittelwasser von Marseille übereinstimmt. Als Höhensystem wurde wie im letzten Jahrhundert ein Gebrauchshöhensystem mit genähert orthometrischen Höhen eingeführt, dessen Höhenunterschiede ohne Schwerereduktion direkt aus den Nivellementen berechnet wurden.

Mit der Einführung der schiefachsigen, winkeltreuen Zylinderprojektion mit dem Fundamentalepunkt in der alten Sternwarte von Bern mit den geodätischen Koordinaten: $L = 7^\circ 26' 22'',50$ und $B = 46^\circ 57' 08'',66$ war auch die Kartenprojektion der Schweizerischen Landesvermessung und damit das Landeskoordinatensystem definiert.

Wesentliche Voraussetzungen für die Durchführung einer Landesvermessung sind nicht nur die technischen Grundlagen, sondern auch die Organisationsstruktur. Gemäss der Verordnung über die Obliegenheiten der Eidg. Landestopographie

vom 10. 5. 1972 ist die L+T verantwortlich für die Erstellung, Erhaltung, Ergänzung und Erneuerung der geodätischen Landesvermessung. Die SGK, ein Organ der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft (SNG), koordiniert die Forschungsarbeiten im Gebiet der Geodäsie und der Landesvermessung, welche von verschiedenen Hochschulinstitutionen unter Mitwirkung der L+T geleistet werden. Die L+T profitiert bei der Ausführung ihrer Arbeiten von den Resultaten der geodätischen Forschung.

Unter den internationalen, wissenschaftlichen Dachorganisationen sind die International Association of Geodesy (IAG) und die Fédération internationale des géomètres (FIG) mit ihren Fachkommissionen zu erwähnen.

2.2 Aufbau 1903 bis 1939

2.2.1 Triangulation 1. bis 3. Ordnung

In den ersten drei Jahrzehnten unseres Jahrhunderts war es Aufgabe der L+T, ein neues Triangulationsnetz 1. bis 3. Ordnung über die ganze Schweiz zu erstellen (Abb. 1). Dabei sollte wenigstens im Mittelland und im Jura die Gradmessungs-Triangulation der SGK übernommen werden, obwohl es namhafte Stimmen gab, die diese Lösung ablehnten, weil sie die Gradmessungs-Triangulation für ungenügend hielten. Die Dreiecke waren von der SGK bedingt ausgeglichen worden. Der mittlere Fehler einer Richtung erreichte nach der Ausgleichung 2,7 cc.

Für die neuen Winkelmessungen kam die von Wild vorgeschlagene Sektormethode zur Anwendung. Mit einer Stationsausgleichung wurden Richtungssätze berechnet und mit Projektionskorrekturen versehen. Das neue Alpennetz wurde in drei Teilen vermittelnd ausgeglichen, wobei das Netz der SGK als fehlerfrei betrachtet wurde. Der mittlere Richtungsfehler erreichte 1,8cc. Die heute gültigen Koordinaten der TP 1. Ordnung beruhen somit für den Teil des schweizerischen Mittellandes noch auf Messungen, die von der SGK für die Gradmessung ausgeführt worden sind, obwohl auch dort neuere Messungen der L+T vorhanden waren. Daraus ergibt sich auch, dass der Netzmassstab auf die Basismessungen der SGK von 1880/81 zurückgeht [10]. Die Koordinaten der TP 2. und 3. Ordnung wurden anschliessend nach der Methode der Einzel-, Doppel- oder Dreipunkteinschaltung ins übergeordnete Netz eingezwängt. Für die Berechnungen standen 6- bis 8stellige Logarithmentafeln und Rechenschieber zur Verfügung.

2.2.2 Landesnivellement (1. Messung)

In den gleichen Zeitraum fällt auch die Messung des Landesnivellements durch die L+T, das über weite Strecken den Linien des NDP der SGK folgt (Abb. 2). Besondere Beachtung fand die sorgfältige

Bestimmung des Lattenmeters. Dank Nivellierlatten mit Invarbändern und Nivellierinstrumenten mit Planplattenmikrometern konnte die Messgenauigkeit ab 1913 erheblich gesteigert werden. Aus Zeitgründen konnte mit der Publikation der Höhen nicht gewartet werden, bis die Messungen abgeschlossen waren, weshalb «provisorische Gebrauchshöhen» publiziert wurden, die aus den Höhen der Knotenpunkte des NDP abgeleitet wurden. Nach Abschluss der Messungen war es dann allerdings zu spät. Die provisorischen Höhen waren schon so oft verwendet worden, dass auf die Einführung neuer, streng ausgeglichener Höhen verzichtet werden musste. Auch beim Nivellement gehen also gewisse Daten, nämlich die Höhen der Knotenpunkte, noch auf die Arbeiten der SGK zurück. Erst 1943 wurde das Netz von Schürer in einem Guss und mit Schwerereduktionen ausgeglichen [32]. Dabei ergab sich ein mittlerer Fehler von 1,4 mm für 1 km Doppelnivellement gegenüber 4 mm beim NDP.

2.3 Erhaltung und Erneuerung bis heute

2.3.1 Arbeiten der Schweizerischen Geodätischen Kommission

Aus der umfangreichen Sammlung von wissenschaftlichen Arbeiten, welche in diesem Jahrhundert unter der Obhut der SGK entstanden sind, möchten wir an dieser Stelle nur eine Auswahl jener erwähnen, welche für die Landesvermessung eine unmittelbare Bedeutung haben [33]. An den Arbeiten haben sich verschiedene Institute beteiligt, allen voran das Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der ETHZ (IGP).

- Astronomisches Nivellement im Meridian des St. Gotthard (N-S Geoidprofil) 1916–18
- Astronomisches Nivellement im Parallel von Zürich (W-E Geoidprofil) 1934–36
- Astronomische Nivellemente im Parallelkreis von Locarno 1939 und im Meridian von Lugano (W-E und N-S Geoidprofile) 1947–48
- Laplace-Azimute auf TP 1. Ordnung: Gurten-Rötiflüh 1945 Rigi-Lägern 1949
- Schweremessungen auf allen neu gemessenen Nivellementslinien 1953–87
- Laplace-Azimute auf verschiedenen TP 1. Ordnung 1961–70
- EDM mit Mikrowellen in den Netzen 1. und 2. Ordnung 1963–70
- EDM mit Lasergeräten in den Netzen 1. und 2. Ordnung 1969–87
- EDM mit Flug-Meteo-Erfassung in den Netzen 1. und 2. Ordnung 1983–87
- Strenge Ausgleichung des Netzes 1. Ordnung für das RETrig 1967–87

- Berechnung von Lotabweichungen und eines Geoidmodells für die Schweiz 1969–78

2.3.2 Arbeiten für RETrig und REUN

Die internationale Zusammenarbeit im Bereich der Geodäsie hat in der Schweiz immer eine grosse Bedeutung gehabt, war es doch z. B. unmöglich, mit rein schweizerischen Messungen den Bezug zwischen dem Schweizerischen Höhenystem und Meerespegeln herzustellen. Heute koordiniert die IAG diese Zusammenarbeit. Für die Landesvermessung von ganz besonderer Bedeutung sind in diesem Zusammenhang die Arbeiten für einheitliche europäische Triangulations- und Nivellementsnetze (RETrig resp. REUN). Auch hier teilten sich die in der SGK vertretenen Institutionen in die Arbeiten.

Beim RETrig übernahm die L+T die Bereitstellung der Winkelmessungen aus den archivierten Feld- und Berechnungsakten und führte für den Anschluss an die Nachbarländer notwendige Ergänzungsmessungen durch. Elektronische Distanzmessungen in den Netzen 1. und 2. Ordnung und zusätzliche Laplace-Punkte wurden durch die SGK und in späteren Jahren durch das IGP bestimmt. Ebenfalls integriert wurden die in den letzten Jahren vom Astronomischen Institut der Universität Bern (AIUB) in Zimmerwald gemessenen Laser-Distanzmessungen nach Satelliten und gewisse Dopplermessungen, die das IGP im Rahmen internationaler Kampagnen gemessen hat. Das IGP übernahm auch die Neubearbeitung der Basisvergrößerungsnetze sowie alle Berechnungen von der Stationsausgleichung der Winkelmessungen bis zur teilreduzierten Normalgleichungsmatrix und der Berechnung der inneren Unbekannten (vgl. Kobold [20] und Wunderlin [37]). Die Blockausgleichung war hingegen Sache der internationalen Rechenzentren. Die Arbeiten der RETrig-Kommission stehen vor dem Abschluss [23].

Beim REUN übernahmen die SGK und das IGP die Schweremessungen entlang den Nivellementslinien. Die L+T berechnete die geopotentiellen Differenzen auf den ausgewählten Linien, die dann von den internationalen Rechenstellen in die Ausgleichung eingeführt wurden. Eine erste Ausgleichung wurde in den fünfziger und sechziger Jahren durchgeführt [1]. Eine zweite ist seit 1973 im Gange. Die freie Ausgleichung der geopotentiellen Differenzen und die statistischen Tests sind weitgehend abgeschlossen [7]. Noch ausstehend ist der Anschluss an die Meerespegel.

2.3.3 Erhaltung und Erneuerung der Triangulation 1. bis 3. Ordnung

Ein Vermessungswerk verliert rasch seinen Wert, wenn es nicht richtig nachge-

führt wird. Schon seit Ende der zwanziger Jahre widmete sich die L+T auch der Erhaltung der Landesvermessung. 1932 erliess das Eidg. Justiz- und Polizeidepartement die Weisungen für die Nachführung der Vermessungsfixpunkte. Darin wird die Zuständigkeit für die Nachführung der Triangulations- und Nivellementsunkte der Landes- und Parzellarvermessung (PV) geregelt. Auch sind die auszuführenden Arbeiten klar umschrieben, der Meldedienst zwischen eidgenössischen und kantonalen Behörden und die Aufteilung der Kosten festgelegt.

Eine Aufgabe unter diesen Nachführungsarbeiten ist die periodische Kontrolle der Vermessungsfixpunkte durch die L+T und die Kantone. In den letzten Jahrzehnten waren die L+T und viele Kantone wegen Personalknappheit und vieler zusätzlicher Aufgaben nicht mehr in der Lage, die TP systematisch zu begehen. Dabei wurden hauptsächlich die Gipfelpunkte vernachlässigt, auch jene der Landestriangulation. Im Hinblick auf geodynamische Zielsetzungen, die mehr und mehr an Bedeutung gewinnen, soll in der Zukunft im Gebirge das Schwergewicht der Unterhaltsarbeiten auf ausgewählte, stabile Punkte 1. bis 3. Ordnung gelegt werden. Dabei handelt es sich hauptsächlich um TP, die im anstehenden Fels verankert sind.

Weitere Nachführungsarbeiten sind TP-Verlegungen, Kontrollmessungen, TP-Einschaltungen oder Versicherungskontrollen, um hier nur die wichtigsten zu erwähnen. Der grösste Teil wird durch die Kantone im Zusammenhang mit Arbeiten in der Triangulation 4. Ordnung erledigt.

Seit etwa zwei Jahrzehnten ist die L+T mit der Umarbeitung der Akten der Triangulation 1. bis 4. Ordnung beschäftigt. Diese Arbeit soll die Anliegen der Armee, aber auch die Bedürfnisse der zivilen Benutzer befriedigen. Hauptprodukte dieser Umarbeitung sind Punktprotokolle im Format A5 für zivile Zwecke und im Format A6 für die Armee, sowie Punktkarten nach Landeskartenblatt-Einteilung. Die laufende Nachführung für zivile Zwecke wird durch die Kantone gewährleistet. Nach Bedarf werden die Akten blattweise und abgestimmt auf den Nachführungsturnus der Landeskarten nachgeführt. Heute sind etwa 70% der Triangulationsakten umgearbeitet, bis Mitte der neunziger Jahre werden sie abgeschlossen sein.

Mit der Einführung der elektronischen Distanzmessung (EDM) in der Nachführung der Triangulation und in der PV wurden in verschiedenen Teilen der Landestriangulation Netzwänge festgestellt, die einige Dezimeter erreichten und die für eine moderne Vermessung nicht mehr akzeptiert werden konnten. Die Ursache liegt primär im Netzaufbau. Die ungünstigen topographischen Verhältnisse und vor allem die Bewaldung in gewissen Gegenden des Mittellandes oder des Juras verhindern

die direkte Verbindung zwischen benachbarten TP. Die Schwäche wurde noch durch die Berechnungsmethode der Einzelpunkteinschaltung verstärkt. Unsere Vorfahren waren sich dieser Mängel durchaus bewusst, konnten aber mit vertretbarem Aufwand und den damaligen technischen Mitteln kaum bessere Lösungen finden.

Anfangs der siebziger Jahre begann die L+T mit den dringendsten Erneuerungen, zunächst mit der gesamten Triangulation 3. Ordnung der Kantone Basel-Land und Basel-Stadt. Besonders prekär war die Situation im Kanton Waadt, wo die ganze Triangulation 1. bis 3. Ordnung ab 1976 erneuert werden musste [30]. Diese Erneuerungen wurden auf Wunsch der kantonalen Vermessungsbehörden speziell für die Bedürfnisse der geplanten Triangulationen 4. Ordnung und der PV in die Wege geleitet. Numerische PV waren bereits in Arbeit, als mit der Erneuerung der Triangulation begonnen wurde, was die Arbeiten unter grossen Zeitdruck brachte. Im kleineren Rahmen mussten später auch Teilnetze 3. Ordnung der Kantone AG und SG erneuert werden. Bevorstehend sind Arbeiten im Kanton SH, wo noch in diesem Jahr GPS-Messungen durchgeführt werden sollen.

Der Triangulationserneuerung liegt in der Regel folgendes Konzept zugrunde:

- Verwendung der Originalmessungen (Richtungen oder Einzelwinkel)
- Ergänzung mit EDM
- und wenigen neuen Richtungsmessungen, insbesondere im Netz 3. Ordnung
- leicht montierbare Hilfstürme oder Masten erlauben zusätzliche Visuren
- Einführung von Laplace-Azimuten, Lotabweichungen und Reduktion der EDM mit ellipsoidischen Höhen (z. B. im Netz 1. und 2. Ordnung der Waadt)
- Gesamtausgleichung aller TP und Hilfspunkte unter Verwendung aller zur Verfügung stehender Beobachtungen.

Die Verwendung alter Beobachtungen kombiniert mit neuen Messungen setzt natürlich voraus, dass die physikalische Punktidentität garantiert werden kann. Dies trifft dank der sorgfältigen Punktversicherung mit Stein und unterirdischer Bodenplatte oder Bolzen mit exzentrischen Kreuzen meistens zu.

2.3.4 Diagnoseausgleichung der Triangulation 1. und 2. Ordnung

1985 hat die L+T beschlossen, eine Gesamtausgleichung der Landestriangulation 1. und 2. Ordnung durchzuführen. Die Forderung nach einer solchen Ausgleichung war nicht neu. Im Rahmen der RETrig-Arbeiten hat Wunderlin die Resultate des Blockes Schweiz mit den offiziellen Koordinaten der TP 1. Ordnung verglichen. Bei der Erneuerung der Triangulation 1.

und 2. Ordnung in der Westschweiz sind solche aus den RETrig-Ausgleichungen entstandene Koordinatensätze zur Stützung des neuen Netzteils verwendet worden. Heute sind die Voraussetzungen für eine neue Gesamtausgleichung gegeben. Das Personal mit der notwendigen Fachkenntnis und Erfahrung sowie geeignete Software für die Datenerfassung und die Ausgleichung sind vorhanden. Die Diagnoseausgleichung soll folgende Zwecke erfüllen:

- Vollständige, einheitliche Dokumentation aller geodätischen Messungen im Triangulationsnetz 1. und 2. Ordnung aus der Epoche 1880–1987 (Abb. 3)
 - Berechnen eines bestmöglichen Koordinatensatzes mit Varianz-Kovarianz-Matrix aller TP 1. und 2. Ordnung
 - Statistische Beurteilung der Genauigkeit der verschiedenen Beobachtungsklassen
 - Analyse der Verzerrungen im offiziell gültigen Triangulationsnetz 1. und 2. Ordnung. Erprobung der mathematischen Modellierung dieser Verzerrung
 - Bereitstellen eines Testnetzes für neue Messtechniken (Doppler, GPS usw.). Damit können unter Umständen systematische Fehler in einem zukünftigen GPS-Referenznetz aufgedeckt werden
 - Berechnung von Parametern für die Datumstransformation zwischen dem schweizerischen geodätischen Datum und weltweiten Referenzsystemen
 - Untersuchung von Deformationen der obersten Erdkruste.
- Dieses Ziel soll in folgenden Etappen erreicht werden:
- Inventar der Messungen
 - Präanalyse
 - Bereinigung der Punktidentifikation
 - Datenerfassung und Bereinigung der Beobachtungen
 - Ausgleichungen und Analysen
 - Publikation und Dokumentation.

Die Präanalyse ist heute bereits abgeschlossen. Zurzeit sind die Bereinigung der Punktidentifikationen sowie die Datenerfassung im Gange. Der Abschluss der Arbeiten ist für den Anfang der neunziger Jahre zu erwarten.

2.3.5 Erhaltung und Erneuerung des Landesnivellements

Nachdem 1927 die Messung der Hauptlinien des Landesnivellements abgeschlossen war und das Netz noch bis 1933 durch Sekundär- und Ergänzungslinien vervollständigt wurde, war es wichtig, die Resultate den Benutzern zugänglich zu machen. Von 1930 an wurden deshalb die Eidg. Nivellementsverzeichnisse (ENV) kantonsweise veröffentlicht. Diese Verzeichnisse dokumentieren alle Eidg. Hö-

henfixpunkte, welche von der L+T und von der Landeshydrologie versichert und eingemessen wurden. Neben der Feldnachführung der FP-Versicherung, welche seit 1903 sichergestellt war, kam nun auch die Nachführung, Revision und Neupublikation der ENV-Dokumentation dazu. Neben den Einzelnachführungen der Punktgruppen werden die FP der einzelnen Kantone periodisch durch Feldrevisionen und Neupublikation der Dokumente erneuert. Seit 1986 erfolgen diese Publikationen in neuer, den modernen technischen Möglichkeiten angepasster Form. Unter der Bezeichnung Landesnivellements-Verzeichnis (LNV) werden die Informationen nun in digitaler Form gespeichert und als Datei nachgeführt. Zu jedem FP werden auch seine aus der Landeskarte digitalisierten Koordinaten mitgespeichert. Die Publikation erfolgt im Einzelblattsystem, wobei die früheren Situationskrokis durch gerasterte Fotos der Versicherungsstelle ersetzt sind. Damit dem Benutzer das Auffinden der FP erleichtert wird, werden zusätzlich Punktkarten (LNPK) in der Form von automatisch erstellten farbigen Eindrucken in die Landeskarten 1:25000 abgegeben.

Wie die Erfahrung nach wenigen Jahren zeigte, genügt die punktuelle Nachführung des Fixpunktnetzes nicht. Wegen Bewegungen der obersten Erdkruste und unvermeidlichen lokalen Höhenänderungen unterschiedlicher Ursache sind periodische Nachmessungen ganzer Nivellementslinien im zeitlichen Abstand von einigen Jahrzehnten notwendig. Deshalb wurde 1943 mit einer systematischen Neumessung des gesamten Landesnivellementsnetzes begonnen. Die finanziellen Mittel der L+T erlauben die Neumessung von etwa 100 km Doppelnivellement pro Jahr. Vor jeder Neumessung wird die Versicherung der FP auf den zu messenden Linien revidiert. Die Strecken zwischen den FP-Gruppen werden mit zusätzlichen Hilfspunkten (Nieten in Randsteinen, Sockeln usw.) unterteilt. Normalerweise genügt die Stabilität dieser Hilfspunkte, um Hin- und Rückmessungen stückweise vergleichen und wenn nötig nachmessen zu können.

Seit 1970 werden Kompensator-Nivelliere Wild NA2 mit aufgesetztem Planplattenmikrometer verwendet. Um Massstabsfehler auch bei Nivellementen über die Alpenpässe möglichst vermeiden zu können, werden interferometrisch geteilte Invarlatten eingesetzt. Lattenmassstab und Lattenfussfehler werden jeweils vor und nach jeder Messkampagne mit Hilfe eines Laserinterferometers überprüft. Für die Lattenumstellung werden speziell entwickelte Lattenuntersätze, welche den Einsinkeffekt auch auf Asphaltbelägen in Grenzen halten, angewendet. Systematische Messfehler sind bei langen Streckenivellementen besonders gefährlich, da sie sich bei diesem Messverfahren durch

die grosse Zahl der Messungen vervielfachen. Neben der regelmässigen Prüfung und Justierung der Nivellierinstrumente und Invarlatten wird eine zeitlich symmetrische Messsequenz mit je zwei Latten angewendet, welche die verschiedenen systematischen Effekte grösstenteils eliminiert. Die Felddatenerfassung erfolgt mit einem tragbaren Computer. Die redundanten Messdaten werden überprüft und im RAM abgespeichert. Am Ende jeder Woche können die gespeicherten Daten im Büro auf die Rechenanlage übertragen und ausgewertet werden.

Mit Ausnahme der drei Juraschleifen konnte bis heute das gesamte Hauptnetz nachgemessen werden. Die zweite Messung der Hauptlinien soll voraussichtlich 1992 abgeschlossen werden. Anschliessend hoffen wir, Nachmessungen der wichtigsten Sekundärlinien in Angriff nehmen zu können.

2.3.6 Kinematische Ausgleichung des Landesnivellements

Wenn mit geodätischen Methoden Lage- oder Höhenänderungen der Erdkruste nachgewiesen werden sollen, muss eine ganze Reihe von Voraussetzungen erfüllt sein. Die Markierung der in der Erde verankerten Fixpunkte muss sehr stabil und dauerhaft sein. Es müssen wenigstens zwei zeitlich genügend weit auseinanderliegende und genügend genaue Messungen der selben Fixpunkte vorhanden sein, damit die Veränderungen grösser werden als die unvermeidlichen Messunsicherheiten. Die systematischen Fehler müssen sehr gut modelliert werden oder müssen wenigstens in allen Messungen gleich wirken, sonst können sie unzutreffende Bewegungen vortäuschen.

Für die Triangulation sind diese Voraussetzungen bis heute nur sehr bedingt erfüllt. Reilly hat zwar Anzeichen für signifikante Deformationen gefunden [28]. Das Datenmaterial ist aber noch unvollständig und systematische Fehler können nicht ausgeschlossen werden. Weitere Untersuchungen sind nötig, um hier Klarheit zu schaffen. Sie können erst nach Abschluss der Diagnoseausgleichung begonnen werden.

Demgegenüber sind die Voraussetzungen beim Landesnivellement einigermassen erfüllt. Zwischen erster und zweiter Messung liegen 50 bis 70 Jahre. Beide Messungen erreichen eine beachtliche Genauigkeit. Bisher konnte eine Auswahl gut verankerter Fixpunkte untersucht werden, obwohl das zweite Nivellement noch nicht abgeschlossen ist. Das Verfahren ist in [13] eingehend beschrieben. Auf Grund der Binnenlage unseres Landes ist es bis heute nicht möglich gewesen, absolute Höhenänderungen zu bestimmen. Vielmehr musste eine willkürlich ausgewählte Fixpunktgruppe bei Aarburg als hypothetische Referenz verwendet werden. Die in

Abb. 4 dargestellten Hebungen geben also die durchschnittliche jährliche Höhenänderung der untersuchten Fixpunkte bezüglich dieser Referenzgruppe wieder. Die dickeren Doppelstriche geben die doppelte Standardabweichung an, was einem Signifikanzniveau von 95% entspricht. Während im Mittelland und im Jura bisher nur minimale Bewegungen gefunden wurden, haben sich die Fixpunkte im Alpenraum gegenüber Aarburg signifikant gehoben. Hebungsmaxima treten im Raum Chur-Thusis und im Raum Brig mit je etwa 1,5 mm/Jahr auf.

2.3.7 Satellitengeodäsie in der Landesvermessung

Als jüngster Zweig verlieh die Satellitengeodäsie der Erdmessung in den 30 Jahren seit Beginn der Raumfahrt starke Impulse. Dank ihrer Möglichkeit, Messstationen über Distanzen von globaler Grössenordnung in einem dreidimensionalen, geozentrischen Koordinatensystem miteinander zu verknüpfen, gab sie den Geodäten die Mittel, ein weltumspannendes, einheitliches Netz von Punkten zu errichten. Die wichtigsten Messmethoden (ausser GPS, vgl. 3.3) und ihre Anwendungen in der Schweiz sollen kurz erwähnt werden (Details vgl. [16]):

- Photographische Richtungsbeobachtungen:
Schmidt-Spiegel der Satellitenstation Zimmerwald des AIUB. (Genauigkeit: Meter-Bereich)
- Dopplermessungen an TRANSIT-Satelliten:
Messkampagnen des IGP (z.B. SWISSDOC und ALGEDOP) sowie Teilnahme an internationalen Kampagnen (z.B. MERITDOC, RETDOC). (Genauigkeit: Dezimeter-Bereich)
- Laser-Distanzmessungen zu Satelliten:
Laser-Telemeter des AIUB in Zimmerwald; Laser-Distanzmessungen zum Satelliten LAGEOS. (Genauigkeit: Zentimeter-Bereich)

Die Anwendung der Satellitengeodäsie für die Landesvermessung der Schweiz ist bis heute auf Forschungsprojekte des AIUB und des IGP beschränkt geblieben. Für die globale Lagerung des schweizerischen Koordinatensystems leisteten diese Arbeiten jedoch wertvolle Grundlagen:

- Die Bestimmung der geozentrischen, dreidimensionalen Koordinaten der Satellitenstation Zimmerwald als Referenzstation in verschiedenen internationalen Messkampagnen mit allen drei oben genannten Methoden.
- Die Bestimmung von Transformationsparametern für das Schweizer Datum «CH-1903» gegenüber globalen Referenzsystemen sowie die Überprüfung von 18 Stationen des Triangulationsnetzes 1. Ordnung der Schweiz auf syste-

matische Fehler in der Doppler-Kampagne SWISSDOC [34].

- Die globale Lagerung des Geoides der Schweiz durch Einmessung von 19 Punkten des Landesnivellements in ALGEDOP [35].

Auf die innere Geometrie der Landesnetze, d. h. auf die Koordinaten von Punkten, hatten diese Messungen jedoch keine Auswirkungen. Photographische Richtungsbeobachtungen und Laser-Distanzmessungen zu Satelliten einerseits sind normalerweise an stationäre Einrichtungen gebunden. Andererseits lag die relative Genauigkeit der tragbaren, an beliebigen Orten einsetzbaren Dopplerempfänger nach mehreren Messtagen noch im Bereich einiger Dezimeter.

3. Entwicklung neuer Mess- und Auswerteverfahren

3.1 Terrestrische Messmethoden

Zu Beginn der sechziger Jahre bahnte sich ein erster Umbruch in der Landesvermessung an. Damals wurden die ersten elektronischen Distanzmessverfahren für geodätische Anwendungen eingesetzt. Für die langen Strecken in den Netzen der Landesvermessung kamen zuerst ausschliesslich die Mikrowellengeräte, bei welchen die Laufzeit der elektromagnetischen Wellen und damit die Distanz mit Hilfe der Phasenmessung an einer, auf den Mikrowellen-Träger aufmodulierten, Sinuswelle gemessen wird, zur Anwendung. Erst mit der Verwendung von Helium-Neon-Lasern als leistungsstarke Lichtquellen konnte auch die elektrooptische Streckenmessung für die Messung langer Dreiecksseiten (bis etwa 70 km) herangezogen werden. Die Verwendung des sichtbaren Lichts als Träger brachte eine Steigerung der Messgenauigkeit gegenüber der Mikrowellenmessung. Grund dafür waren der kleinere Einfluss der nur schwer erfassbaren Luftfeuchtigkeit auf die Ausbreitung des Trägers und damit auf die gemessene Strecke sowie die bessere Bündelung des Messstrahls und damit die Vermeidung von Bodenreflexionen. Die Vorteile der elektrooptischen Methode mussten aber mit dem operationellen Nachteil der starken Abhängigkeit von den zur Messzeit herrschenden Sichtverhältnissen erkauft werden.

Anfänglich waren es noch reine Versuchsmessungen zur Erprobung der Messmethode, welche das IGP im Rahmen des Forschungsprogramms der SGK im Triangulationsnetz 1. und 2. Ordnung durchführte. Später hat das IGP in einem mehrjährigen Programm Distanzen zur Überprüfung der Landestriangulation und für die RETrig-Ausgleichung gemessen. Seit Beginn der siebziger Jahre leistet die EDM sehr gute Dienste bei der Nachführung

und Erneuerung der Landestriangulation durch die L+T.

Die EDM hat gegenüber der klassischen Triangulation eine beträchtliche Genauigkeitssteigerung bei der relativen Punktbestimmung in den Netzen der Landesvermessung ermöglicht. Auch in topographisch schwierigen Gebieten lassen sich mit Hilfe einer geeigneten Kombination von Richtungs- und Distanzmessungen Netzschwächen ohne grossen Aufwand vermeiden.

Für erweiterte Zielsetzungen der Landesvermessung, wie etwa für die Untersuchung der Kinematik der obersten Erdkruste, sollten relative Messgenauigkeiten von 0,1 ppm erreicht werden können, um innerhalb weniger Jahrzehnte Deformationen signifikant nachweisen zu können. Begrenzender Faktor für die Genauigkeit der modernen EDM-Geräte ist heute die Erfassung des integralen Brechungskoeffizienten längs des Messweges für die troposphärische Reduktion der Distanzen. Andere systematische Fehlereinflüsse wie die Abweichungen der Modulationsfrequenz und die Nullpunktfehler sind bei den heutigen Geräten nicht mehr kritisch oder können zumindest zuverlässig unter Kontrolle gehalten werden. In den letzten zehn Jahren wurde versucht, das Problem der Erfassung des integralen Brechungskoeffizienten längs des Messstrahls auf zwei verschiedenen Wegen zu lösen:

- Methode der Flug-Meteo-Erfassung:
Durch quasi-simultanes Abfliegen der Umgebung der Visurstrahlen mit Kleinflugzeugen und gleichzeitiger Erfassung von Temperatur und Luftfeuchtigkeit mit am Flugzeug angebrachten Messsonden.
- Mehrfarbendistanzmessung:
Erfassung des integralen Brechungskoeffizienten entlang des Lichtstrahls nach der Dispersionsmethode. Es werden zwei verschiedene Träger mit unterschiedlicher Frequenz (rot, blau) verwendet und moduliert. Aus der Differenz der simultanen Phasenmessung an den modulierten Wellen beider Träger lässt sich der integrale Brechungskoeffizient berechnen.

Die Flug-Meteo-Erfassung ist vom IGP in den letzten Jahren sowohl für Mikrowellen wie auch für elektrooptisch gemessene Distanzen erprobt worden und hat besonders im Alpenraum zu guten Resultaten geführt [9]. Beim Einsatz dieser Methode zusammen mit modernsten Laser-Distanzmessern lassen sich Standardabweichungen von 0,3 mm und 0,15 ppm [17] erreichen. Im Gegensatz dazu wurde die Mehrfarbendistanzmessung in der Landesvermessung bis heute nicht eingesetzt. Sie hat ihre Leistungsfähigkeit aber in der Ingenieurvermessung bewiesen [12]. Ein Durchbruch dieser Methode dürfte erst mit der Verfügbarkeit eines lei-

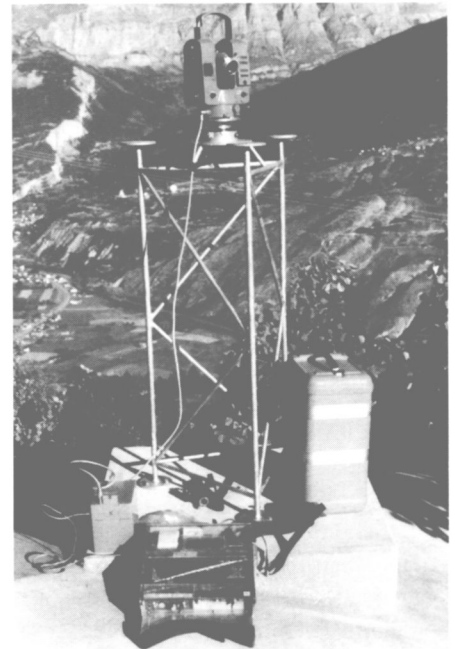


Abb. 5: Datenerfassung in Triangulation und Nivellement mit einem tragbaren Computer vom Typ Epson HX-20

stungsfähigen und kompakten Lasers im blauen Spektralbereich möglich werden. Bei der klassischen geodätischen Winkelmessung mit Theodoliten hat sich lange Jahrzehnte kaum etwas verändert. Eine wesentliche Verbesserung der Messgenauigkeit der Methode war kaum mehr zu erwarten, da, genau wie bei der EDM, auch hier die troposphärische Refraktion die Messgenauigkeit begrenzt. Für die Berücksichtigung der Höhen- und Seitenrefraktion liegen verschiedene Ansätze vor, welche z. T. auch bereits in Feldversuchen erprobt wurden. Ähnlich wie bei der Mehrfarbendistanzmessung können auch bei der Winkelmessung durch simultane Messung mit zwei verschiedenfarbigen Lichtstrahlen die Refraktionseinflüsse erfasst werden. In der Schweizerischen Landesvermessung liegen aber bis heute keine praktischen Erfahrungen mit dieser Methode vor. Bei der Höhenwinkelmessung hat sich die Schätzung der Refraktionswinkel mit Hilfe der Kollokation unter Verwendung eines empirischen Korrelationsansatzes nach Wunderlin [38] im praktischen Einsatz bewährt.

Die Autokollimation bei der Höhenwinkelmessung, die elektronische Kreisablesung und die on-line Datenerfassung mit Feldcomputern haben eine beträchtliche Steigerung der Produktivität sowie eine höhere Zuverlässigkeit der Messmethode gebracht (Abb. 5). In Gebirgsnetzen ist vor allem die automatische Erfassung und rechnerische Korrektur der Reststehachschiefe als weiterer Fortschritt in der Entwicklung zu verzeichnen.

Ähnlich wie bei der Winkelmessung sind auch bei der Nivellementstechnik keine umwälzenden Entwicklungsschritte erfolgt. Die Einführung der Kompensatorni-

velliere hat eine bedeutende Vereinfachung der Handhabung und damit eine wesentliche Rationalisierung der Messungen zur Folge gehabt. Dass jeder Fortschritt seinen Preis hat, sieht man auch an diesem Beispiel. So musste man zu Beginn der achziger Jahre erkennen, dass sich bei vielen, Nord-Süd verlaufenden, langen Nivellementslinien, welche mit automatischen Nivellierinstrumenten gemessen worden waren, unerwünschte systematische Effekte eingeschlichen hatten. Nach eingehenden Untersuchungen der Messgeräte wurde festgestellt, dass die mechanische Aufhängung gewisser Kompensatoren durch das Erdmagnetfeld systematisch beeinflusst und so die Messungen verfälscht werden. Diese Nivellierinstrumente wurden in der Folge von den Herstellern überprüft und die Konstruktion der Kompensatoren verbessert. Die L+T hatte beim Landesnivellement grosses Glück, so dass im Gegensatz zu den Netzen in Nachbarländern aus diesem Grund keine Nivellemente nachgemessen werden mussten.

In den siebziger Jahren wurde die Handhabung der interferometrischen Längenmesstechnik mit dem Einsatz der Laser-Interferometrie stark vereinfacht. Damit wurde es möglich, die regelmässige Prüfung der Invar-Nivellierlatten auf einer Laser-Interferometer-Messbahn auszuführen. Mit diesem Messverfahren lässt sich der Lattenmassstab genau und zuverlässig in direkten Bezug zur Meterdefinition bringen. Gleichzeitig werden auch die Qualität der Lattenteilung und der absolute Lattenfussfehler überprüft. Der Ausdehnungskoeffizient des Invarbandes kann in einer Klimakammer mit dem gleichen Messverfahren bestimmt werden. In neuester Zeit kann die interferometrische Messtechnik auch bei der Produktion der Lattenteilung angewendet werden. Auf diese Weise können die Teilungsfehler der Latten sehr klein gehalten werden.

Die Nivellementsverfahren sind zwar für die Bestimmung von Höhendifferenzen über grosse Strecken bezüglich der erreichten Genauigkeit immer noch kaum zu schlagen. Die Messungen sind aber sehr personalintensiv und damit teuer. In den letzten Jahrzehnten wurden deshalb verschiedene Anstrengungen zur Rationalisierung des Verfahrens unternommen. Das motorisierte Nivellement, bei welchem das Nivellierinstrument und zwei Latten je in einen Kleinwagen eingebaut werden, hat sich dort durchgesetzt, wo im Flachland neue Nivellementslinien über grosse Strecken zu bewältigen waren. In unserem gebirgigen Land mit den z. T. engen Strassenverhältnissen ist die Methode praktisch kaum brauchbar. Grössere Erfolgsaussichten hat ein anderer Entwicklungsvorschlag, bei welchem die trigonometrische Höhenmessung kombiniert mit Distanzmessung automatisiert wird. Das sogenannte RPLS

(Rapid Precision Levelling System) verwendet ein Zweifarbenverfahren für die «refraktionsfreie» Höhenwinkelmessung [11]. Für das Landesnivellement hat jede Änderung des Messverfahrens den Nachteil, dass auch die systematischen Einflüsse ändern. Dadurch wird ein Vergleich mit alten Messungen, wie er etwa für die Bestimmung von Vertikalgeschwindigkeiten bei der kinematischen Ausgleichung gebraucht wird, problematisch.

3.2 Astronomische Geodäsie

Die astronomische Geodäsie hat mit dem Aufkommen der Satellitengeodäsie für die Landesvermessung zweifellos an Bedeutung verloren. Zwei Entwicklungen sind jedoch interessant und erwähnenswert. Mit der Entwicklung transportabler Zenitkameras [3] wurde die genaue Messung von Lotabweichungen beschleunigt und damit die Geoidbestimmung nach der astro-geodätischen Methode stark geför-

dert. Die Kenntnis feinsten Geoidstrukturen (cm-Geoid) ist für die Umrechnung der ellipsoidischen Höhen der Satellitengeodäsie in orthometrische Höhen, wie sie das Nivellement zusammen mit gravimetrischen Messungen liefert, unerlässlich.

Die zweite Neuerung in der astronomischen Geodäsie brachten die elektronischen Theodolite mit automatischer Messwertregistrierung. Insbesondere bei automatischer Kompensation der Stehachsenschiefe kann die Messung astronomischer Azimute bei gleichbleibender Genauigkeit im Vergleich zu traditionellen Verfahren stark beschleunigt und vereinfacht werden. Astronomische Azimute sind auch im Zusammenhang mit satellitengestützten Messmethoden von Interesse, weil der spezifische Vorteil, nicht auf Sichtverbindungen zwischen den Messpunkten angewiesen zu sein, bei der Richtungsübertragung aufgegeben werden müsste.



Abb. 6: GPS-Empfänger Trimble 4000SL

3.3 Satellitengeodäsie

Die Messmethoden der Satellitengeodäsie wurden in den vergangenen drei Jahrzehnten insbesondere für Forschungsprojekte, für kontinentale und globale Vermessungen sowie für Grundlagenvermessungen in unvermessenen Gebieten eingesetzt. Neben der radioastronomischen Methode der Very Long Baseline Interferometry (VLBI) haben die Laser-Distanzmessungen nach Satelliten (SLR) breite Anwendung in der Geodynamik gefunden; an der globalen Bestimmung des Erdschwerefeldes sind sie massgebend beteiligt gewesen. Da die präzise bestimmten SLR-Stationen meist ortsfest installiert sind, bilden sie geeignete Referenzstationen, um nationale und regionale Netze daran anzuschliessen und zu verknüpfen. Dagegen sind für die Errichtung und Nachführung geodätischer Netze der Landesvermessung (und kleinräumiger Netze) andere Satellitenmessmethoden mit mobilen Satellitenempfängern notwendig.

Da der Aufbau eigener Systeme speziell für die Vermessung zu teuer wäre, macht man sich die Vorteile satellitengestützter Navigationssysteme zunutze. Grössere Genauigkeiten werden dabei durch (unterschiedlich lange) stationäre Aufstellungen und differentielle Messverfahren erreicht. Beim amerikanischen Navy Navigation Satellite System (NNSS) senden die TRANSIT-Satelliten Radiosignale mit konstanter Frequenz aus, die auf der Erde um die Dopplerfrequenz verschoben empfangen werden. Die zeitliche Integration dieser Dopplerverschiebungen ermöglicht die Bestimmung von Distanzunterschieden Erde – Satellit zu verschiedenen Zeiten. Mit bekannter Satellitenbahn kann daraus die Position des Satellitenempfängers bestimmt werden. Für relative Genauigkeiten im Bereich einiger Dezimeter muss eine Station allerdings mehrere Tage besetzt bleiben. Dopplermessungen zu TRANSIT-Satelliten wurden vor allem für Fixpunktbestimmungen in bisher unvermessenen Gebieten der Erde sowie zur globalen Kombination nationaler Landesvermessungen benützt (Bestimmung von Transformationsparametern) [34]. Auf die Einsätze in der Schweiz wurde bereits in 2.3.7 hingewiesen.

Eine wesentliche Genauigkeitssteigerung um etwa zwei Zehnerpotenzen bringt heute das Satelliten-Navigationssystem NAVSTAR/GPS (Global Positioning System). Dieses auf Beginn der neunziger Jahre operationell werdende System mit 18 Satelliten wird nicht nur genauer, sondern auch schneller und kontinuierlich verfügbar sein. Von den verschiedenen möglichen Messmethoden hat für die Vermessung die differentielle Phasemessung an den Trägerwellen derselben Satelliten mit mindestens zwei Empfängern die grösste Bedeutung. Auf eine genaue Beschreibung der Messverfahren bei GPS wird hier

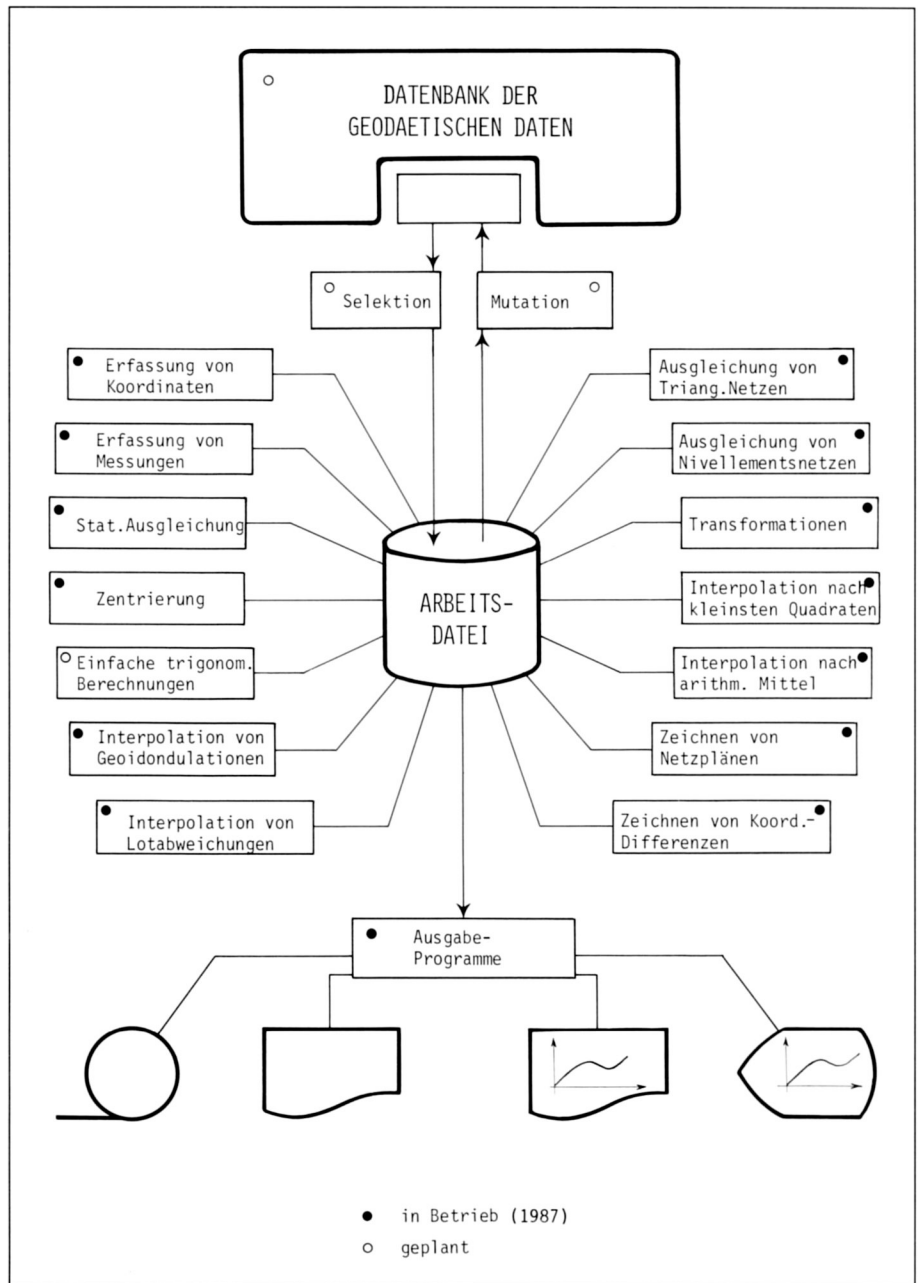


Abb. 7: Das geodätische Programmsystem der Landestopographie

verzichtet, wurden sie doch auch in dieser Zeitschrift schon mehrmals erläutert [2, 15, 16, 22].

Die L+T hat die Bedeutung der neuen GPS-Technik für die Landesvermessung frühzeitig erkannt. Nachdem die Entwicklung von Anfang an verfolgt worden war, konstituierte sich 1985 eine Arbeitsgruppe «GPS» der SGK mit dem Ziel, die Forschung auf diesem Gebiet zu koordinieren. Als erstes konkretes Ziel hat die Arbeitsgruppe 1985 das dreidimensionale «Testnetz Turtmann» mit etwa 5 km x 6 km x 1 km Ausdehnung im Wallis installiert, terrestrisch vermessen und dreidimensional ausgeglichen. Seit dem Herbst 1985 fanden darin GPS-Testmessungen mit 5 verschiedenen Empfängertypen statt. Die Auswertungen dieser Tests, die am AIUB mit der dort entwickelten Software durchgeführt worden sind, haben das grosse

Potential der neuen Messtechnik bestätigt. Aus der Transformation der verschiedenen GPS-Lösungen auf die terrestrischen Koordinaten ergaben sich Standardabweichungen von 2 bis 4 mm in der Lage und 2 bis 14 mm in der Höhe [17]. Bis Ende 1987 hat die L+T eigene GPS-Empfänger sowie die zur Auswertung nötige Feld- und Auswerte-Software beschafft. Unseren Ingenieuren und Technikern wurden sowohl die theoretischen Grundlagen wie auch die praktischen Kenntnisse für Bedienung und Auswertung in Seminaren und praktischen Kursen vermittelt. Ab Frühjahr 1988 kann die neue Messmethode in der Landesvermessung produktiv eingesetzt werden (Abb. 6). Es gilt nun vor allem praktische Erfahrungen beim Einsatz der Methode zu sammeln, zudem sind noch viele Probleme in diesem Zusammenhang zu lösen.

3.4 Entwicklung der Ausgleichungsverfahren

3.4.1 Klassische Ausgleichung von Lage- und Höhennetz

Die geodätischen Netze werden seit über 100 Jahren nach der Methode der kleinsten Quadrate, bei konventionellen Triangulationsnetzen in der Regel in Lage und Höhe getrennt, ausgeglichen. Die Lageausgleichung erfolgt entweder auf dem Ellipsoid oder in der Projektionsebene, während die Höhe gewöhnlich auf das Geoid bezogen wird. Seit den sechziger Jahren lassen sich mit leistungsfähigen Computern grössere Netze in einem Guss ausgleichen. Die L+T hat ab 1969 damit begonnen, ein Programmsystem für die spezifischen Bedürfnisse der Landesvermessung aufzubauen (Abb. 7).

Das Programm LTOP [25], welches bei der L+T für Netzberechnungen eingesetzt wird, wurde ständig erweitert. Die Koordinaten werden mit dem Programm PKTED, die Messungen mit dem Programm MESSED vom Feldcomputer übernommen oder interaktiv erfasst und für die Netzausgleichung aufbereitet [26]. Dabei werden unter anderem die Stationsausgleichung der Richtungssätze wiederholt, die Höhenwinkel gemittelt und Meteorrekturen an den EDM angebracht. Das Ausgleichsprogramm reduziert die gemessenen Strecken in die Projektionsebene und bringt auf Wunsch Reduktionen an den Richtungen und Azimuten an (Azimutreduktion und Lotabweichungskorrekturen). Anschliessend werden Lage und Höhe getrennt ausgeglichen. Als Ergebnis werden gedruckt: Titelblatt, Koordinaten und Höhen mit Angaben über ihre Genauigkeit, alle Elemente der Distanzreduktion, die vollständigen Lage- und Höhenabrisse mit Angaben über Genauigkeit und Zuverlässigkeit. Letztere erlauben einerseits Genauigkeit und Zuverlässigkeit des Netzes a priori, d.h. vor der eigentlichen Messung abzuschätzen und andererseits die Qualität der ausgeführten Messungen umfassend zu beurteilen. Damit kann eine Netzoptimierung beim Netzentwurf erreicht werden und die Anzahl Messungen bei gleichbleibender Netzqualität reduziert werden. Es ist ohne weiteres möglich, auch grössere Netze mit einigen Hundert Punkten in einem Guss auszugleichen. Eine vollwertige Version für IBM-PC kann 100 Neupunkte mit 750 Richtungen, Distanzen und Höhenmessungen verarbeiten.

Als Erweiterung wird in nächster Zeit die Einführung von Festpunktkoordinaten als Beobachtung vorgesehen im Sinne einer zusätzlichen Verbesserung der Zuverlässigkeitsanalyse. Längerfristig sind neue Zuverlässigkeitsindikatoren für die Neupunkte und für die Messungen vorgesehen.

Das Programm GEOLOT basiert auf einem am IGP entwickelten Programm LAG

[14]. Es berechnet Lotabweichungen und Geoidhöhen aus einem digitalen Geländemodell und den astro-geodätisch bestimmten Lotabweichungen, welche dann von LTOP direkt verarbeitet werden können.

Zwei Aufgaben, die in der geodätischen Praxis oft vorkommen, sind der Vergleich mehrerer unabhängig gemessener Netze mit gemeinsamen Punkten und die Einpassung neuer Netze in bestehende Fixpunktfelder. Um diese Aufgaben einwandfrei lösen zu können, wurde bei der L+T das Programm TRANSINT [6, 4, 27] für die Ähnlichkeitstransformation und die Interpolation nach dem arithmetischen Mittel entwickelt. Dieses Programm wurde in der Erneuerung der Landestriangulation mit Erfolg eingesetzt [5].

3.4.2 Dreidimensionale Ausgleichung

Bei modernen Triangulationsnetzen mit elektronisch gemessenen Raumstrecken im Gebirge hat die Aufspaltung in Lage- und Höhenausgleichung grundsätzliche Nachteile. Die stark geneigten Raumstrecken haben nicht nur einen Einfluss auf die Lagekoordinaten, sondern auch auf die Höhe. Dieser funktionale Zusammenhang kann bei der klassischen Berechnungsweise nur durch abwechselungswises Iterieren von Lage- und Höhenausgleichung berücksichtigt werden. Im Gegensatz dazu verknüpft das mathematische Modell der dreidimensionalen Ausgleichung alle beobachteten geometrischen Elemente direkt mit den drei unbekanntenen Koordinaten der Netzpunkte.

Die dreidimensionalen Ausgleichungsmodelle erhalten natürlich besondere Bedeutung, falls terrestrische Beobachtungen mit GPS-Beobachtungen in einer gemeinsamen Ausgleichung kombiniert werden sollen. Funktionale Modelle, bei welchen die Beobachtungsgleichungen direkt in einem geozentrischen, kartesischen Koordinatensystem formuliert sind, können sehr einfach für solche kombinierte Netzausgleichungen erweitert werden.

Die L+T hat im Rahmen ihrer GPS-Tests eine erweiterte Version des Programms RAUMTRI [31] für die gemeinsame, dreidimensionale Ausgleichung von terrestrischen und GPS-Messungen eingesetzt.

4. Bedürfnisse und zukünftige Konzepte der Landesvermessung

4.1 Anforderungen an die Landesvermessung der Zukunft

Die heute an eine geodätische Landesvermessung zu stellenden Anforderungen könnten etwa wie folgt umschrieben werden: Es soll ein homogenes Fixpunktnetz unterhalten und den steigenden Anforderungen laufend angepasst werden. Einmal

an dieses Netz angeschlossene Vermessungen sollen spannungsfrei zusammengefügt und auch nach langer Zeit dazu verwendet werden können, um vermessene Objekte zu rekonstruieren resp. seit der Vermessung eingetretene Veränderungen nachweisen zu können. Dies verlangt eine sehr dauerhafte Versicherung der Fixpunkte an Objekten, deren Stabilität sichergestellt ist. Die Genauigkeit muss so gross sein, dass spezielle Vermessungen nur für höchste Ansprüche notwendig werden, beispielsweise bei Tunnelabsteckungen. Die Zuverlässigkeit der Koordinaten muss so hoch sein, dass Kontrollen bei deren Verwendung auf ein Minimum beschränkt werden können.

Die Erfahrung zeigt, dass die Anforderungen an das Fixpunktnetz ständig wachsen. Vor allem bei grösseren Baubjekten werden immer kleinere Toleranzen vorgegeben. Die Benutzer verfügen über genauere Instrumente, stellen Widersprüche fest oder werden durch diese irritiert. Besonders deutlich wurde dies, als die Geometer sich mit elektronischen Distanzmessern ausrüsteten. Mit steigender Genauigkeit werden auch die zeitlichen Veränderungen immer wichtiger, seien das Bewegungen der Erdkruste, Rutschungen oder lokale Veränderungen. Immer häufiger werden die Daten der Landesvermessung auch auf modernen Datenträgern verlangt.

Neue Benutzerkreise werden sich die Landesvermessung zunutze machen, etwa für geophysikalische Untersuchungen, für die Navigation zu Lande, zu Wasser oder in der Luft, aber auch für die Ingenieurvermessung. Neben den orthometrischen Höhen, die z. B. im Wasserbau zweckmässig sind, werden auch dreidimensionale, kartesische Koordinaten benötigt werden, wie sie von modernen Vermessungssystemen geliefert werden. Mindestens für die absehbare Zukunft werden also Nivellement und moderne Methoden nebeneinander für Höhenmessungen eingesetzt werden. Die Anforderungen werden wachsen, weil die Benutzer neue Messmethoden einsetzen. Diese Messmethoden werden aber auch für die Modernisierung der Fixpunktnetze zur Verfügung stehen. Im Vordergrund stehen zurzeit satellitengestützte Vermessungsmethoden, allen voran GPS. Wie etwa aus [2] abgeschätzt werden kann, liegt die erreichbare Genauigkeit von GPS-Messungen zwischen 0,1 und 0,01 ppm. Es ist also nur eine Frage der Zeit, bis ein Fixpunktnetz über die ganze Schweiz eine absolute Genauigkeit von 1 cm erreichen kann. Die Verzerrungen im heute verwendeten Fixpunktnetz können dann durch Vergleichen mit neuen, «fehlerfreien» Koordinaten bestimmt und anschliessend mit mathematischen Methoden modelliert werden. Dadurch wird es möglich, bestehende Vermessungen zu entzerren.

4.2 Die Bedeutung kontinentaler und globaler Referenzsysteme

Die satellitengestützten Vermessungssysteme haben unter anderem auch den immensen Vorteil, dass genaue Messungen über Tausende von Kilometern möglich sind. Somit können nationale Netze einfach und sehr genau miteinander und auch mit weltweiten Systemen in Beziehung gebracht werden. So ist die Laserstation Zimmerwald in einem weltweiten Koordinatensystem auf wenige Zentimeter genau bestimmt. Gerade für wissenschaftliche Zwecke werden heute Datenbanken angelegt, in denen z. B. Schwerewerte von der ganzen Welt in einem einheitlichen System erfasst und verwaltet werden. Mit der zunehmenden Verbreitung satellitengestützter Navigationssysteme wird eine weitere grosse Benutzergruppe auf Koordinaten in verschiedenen Systemen angewiesen sein. Weltweite Systeme sind oft in dreidimensionalen kartesischen Koordinatensystemen definiert. Weil damit die Trennung in Lage und Höhe wegfällt, sind solche für praktische Zwecke allerdings weniger geeignet. Sie werden also eher intern für Berechnungen gebraucht, für den Benutzer aber nach wie vor in Lagekoordinaten und Höhen umgerechnet werden.

4.3 Kinematische Aspekte der Landesvermessungsnetze

Noch vor wenigen Jahrzehnten waren sich die Wissenschaftler nicht einig, ob und wie sich die Kruste unseres Planeten verändert. Heute weiss man, dass sich die Kontinente verschieben (Plattentektonik), dass gebirgsbildende Kräfte nach wie vor aktiv sind und sich deshalb unser Lebensraum nicht nur qualitativ verändert, sondern dass er auch geometrisch ständig deformiert wird. Allerdings sind diese Änderungen so gering, dass es sehr genaue Messungen braucht, um sie innert nützlicher Frist nachweisen zu können. Wie in 2.3.6 gezeigt wurde, konnten Höhenänderungen schon mit den klassischen Verfahren signifikant nachgewiesen werden. Mit den neuen Messtechniken können auch horizontale Relativ-Verschiebungskomponenten mit ausreichender Genauigkeit bestimmt werden. Diese können längerfristig sogar die Genauigkeit unserer Vermessungen spürbar beeinträchtigen. Für die Erdwissenschaft sind die Bewegungen der «stabilen» Fixpunkte von grossem Interesse, denn sie werden das Verständnis für die in der Erdkruste ablaufenden Prozesse vertiefen. Dies wiederum kann z. B. für die Abschätzung von Erdbebenrisiken im Zusammenhang mit grossen Bauwerken von entscheidender Wichtigkeit sein. Dabei wäre noch zwischen verschiedenen Ursachen wie tektonischen, geologischen, bodenmechanischen und oberflächlichen Bewegungen, aber auch direk-

ten und indirekten Gezeiteneinflüssen zu unterscheiden.

4.4 Ein GPS-Landesnetz als geodätisches Bezugssystem in Raum und Zeit

Es ist möglich, mit einer oder wenigen permanent betriebenen GPS-Stationen ein geodätisches Referenzsystem aufzubauen. Es wäre aber sehr kurzfristig, sich ausschliesslich auf ein Messsystem stützen zu wollen, auf das wir keinerlei Einfluss haben. Die langfristige Verfügbarkeit, aber auch die Verwundbarkeit bei kriegerischen Auseinandersetzungen verbieten solche Lösungen. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Genauigkeit längerfristig abnimmt, beabsichtigt oder unbeabsichtigt. Wir können also GPS lediglich als Messmethode einsetzen, werden aber nach wie vor auf materialisierte Fixpunkte, verteilt über das ganze Land, angewiesen sein. Die konventionellen Vermessungsmethoden werden ja auch noch längere Zeit auf Fixpunkte angewiesen sein.

Ein genauer Terminplan für die Realisierung eines GPS-Landesnetzes kann zum heutigen Zeitpunkt nicht angegeben werden. Das wird wesentlich von der weiteren Entwicklung des Systems, dem Fortschritt in der internationalen Zusammenarbeit und den verfügbaren Mitteln abhängen. Gute Voraussetzungen bestehen allerdings dank der engen Zusammenarbeit zwischen allen interessierten Stellen in der Schweiz, insbesondere mit der SGK, dem AIUB und den geodätischen Instituten der Hochschulen. Während die Hochschulen sich vor allem auf die Erforschung und Weiterentwicklung der Methode konzentrieren, ist es Aufgabe der L+T, die neuen Techniken für die Landesvermessung nutzbar zu machen. In diesem Sinn ist die Messung eines landesweiten, dreidimensionalen GPS-Netzes für den Anfang der neunziger Jahre geplant.

Im weltweiten Rahmen und möglicherweise auch im Rahmen einer europäischen Zusammenarbeit wird ein Netz von Permanentstationen betrieben werden, das genaue Satellitenbahnen liefert und das zudem den Bezug zu den anderen modernen Messsystemen wie SLR und VLBI herstellen wird. Wir hoffen, zusammen mit dem AIUB, eine permanente GPS-Station in Zimmerwald aufbauen zu können. Wir denken auch daran, die Verbreitung von Bahndaten für andere Benutzer in der Schweiz zu organisieren. (Als Alternative wäre auch der Aufbau eines Berechnungsdienstes für andere Benutzer des Systems denkbar.)

Die L+T hat sich zum Ziel gesetzt, den Einsatz von GPS für die Fixpunktbestimmung in der Schweiz kräftig zu fördern. Die dabei gewonnenen Erfahrungen sollen auch den kantonalen Vermessungsämtern und privaten Firmen zur Verfügung

gestellt werden. Wir denken an Fortbildungsseminare und die Erarbeitung von Anleitungen und Vorschriften.

Abkürzungen:

AIUB	= Astronomisches Institut der Universität Bern
ALGEDOP	= Alpine Geoid Doppler Project
EDM	= Elektronische Distanzmessungen
ENV	= Eidgenössisches Nivellementsverzeichnis (alt)
FIG	= Fédération internationale des géomètres
FP	= Fixpunkt
GEOLOT	= Programm der L+T zum Berechnen von Lotabweichungen und Geoidhöhen (siehe LAG)
GPS	= Global Positioning System
IAG	= International Association of Geodesy
IGP	= Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich
L+T	= Bundesamt für Landestopographie
LAG	= Programm zum Berechnen von Lotabweichungen und Geoidhöhen aus Massen
LAGEOS	= Laser Geodynamic Satellite
LNPK	= Landesnivellements-Punktkarte
LNV	= Landesnivellements-Verzeichnis (neu)
LTOP	= Programm der L+T zum Ausgleichen von Triangulationsnetzen
MERITDOC	= Monitoring Earth Rotation and Intercomparison of Techniques Doppler Observation Campaign
MESSED	= Programm der L+T zur interaktiven Erfassung von Messungen
NAVSTAR	= Navigation Satellite Time and Ranging
NNSS	= Navy Navigation Satellite System
NDP	= Nivellement de précision der SGK
PKTED	= Programm der L+T zur interaktiven Erfassung von Koordinaten
PV	= Parzellarvermessung
RAUMTRI	= Programm zur dreidimensionalen Netzausgleichung
RETDOC	= RETrig-Doppler Observation Campaign
RETrig	= Europäisches Triangulationsnetz
REUN	= Europäisches Nivellementsnetz
RPLS	= Rapid Precision Levelling System
SGK	= Schweizerische Geodätische Kommission
SLR	= Satellite Laser Ranging
SNG	= Schweizerische Naturforschende Gesellschaft
SWISSDOC	= Swiss Doppler Observation Campaign

TP	= Triangulationspunkt
TRANSINT	= Programm der L+T für Transformationen und Interpolationen
TRANSIT	= U.S. Satellitenserie
VLBI	= Very Long Baseline Interferometry
VPK	= Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik (Zeitschrift)

Literatur:

- [1] Alberda J.E.: Report on the adjustment of the United European Levelling Net and related computations. Netherlands Geodetic Commission, Vol. 1, Nr. 2.
- [2] Beutler G., Rothacher M.: Auswertungen der 1984-Alaska-GPS-Kampagne. VPK 6/86, p. 213–218.
- [3] Bürki B., Kahle H.-G., Schmid H.H.: Das neue Zenitkamera-Messsystem am IGP: Ein Beitrag zur astronomisch/geodätischen Messtechnik für Lotabweichungsmessungen im Gebiet der Ivrea-Zone. VPK 10/83, p. 349–354.
- [4] Carosio A.: Robuste Ausgleichung. VPK 11/79, p. 293–297.
- [5] Carosio A.: Anwendung von Interpolationsverfahren in der Landestriangulation. VPK 10/80, p. 405–407.
- [6] Carosio A.: Robuste Ähnlichkeitstransformation und Interpolation nach dem arithmetischen Mittel. VPK 6/82, p. 196–200.
- [7] Ehrnsperger W., Kok J.: Status and results of the 1986 adjustment of the United European Levelling Network – UELN-73. In: H. Pelzer und W. Niemeier (Eds.), Determination of Heights and Height Changes, Bonn 1987, p. 7–45.
- [8] Elmiger A.: Erste Ergebnisse einer Geoidbestimmung für die Schweiz aus astronomischen und interpolierten Lotabweichungen. Bericht an die SGK, Zürich, Juni 1975.
- [9] Elmiger A.: Testnetz und Alpentraverse Gotthard. Kurzbericht an die SGK, Sitzung vom 11.11.1985.
- [10] Fischer W.: The Scale of the Swiss First Order Triangulation Net. Bericht Nr. 30 aus dem IGP, Zürich 1979.
- [11] Gächter B.F., Huiser A.M.J.: The Rapid Precision Levelling System Project. Firmennachricht der Wild Heerbrugg AG, 1987.
- [12] Gervaise J.: Résultats de mesures géodésiques avec le Terramètre, appareil électronique de mesure de distances à deux longueurs d'ondes. VPK 6/84, p. 189–194.
- [13] Gubler E., Schneider D., Kellerhals P.: Bestimmung von rezenten Bewegungen der Erdkruste mit geodätischen Methoden. Technischer Bericht 84–17 der NAGRA, Baden 1984.
- [14] Gurtner W.: Das Geoid in der Schweiz. Astronomisch-geodätische Arbeiten in der Schweiz. 32. Band, Zürich 1978.
- [15] Gurtner W.: GPS-Testmessungen auf dem CERN-LEP-Kontrollnetz. VPK 6/86, p. 219–224.
- [16] Gurtner W., Beutler G.: Die Rolle der Satellitengeodäsie in der Vermessung. VPK 8/86, p. 336–341.
- [17] Gurtner W., Beutler G., Botton S., Rothacher M., Geiger A., Kahle H.-G., Schneider D., Wiget A.: The Use of the Global Positioning System in Mountainous Areas. Paper presented at the XIXth IUGG General Assembly, Vancouver, August 1987.
- [18] Hilfiker J.: Untersuchung der Höhenverhältnisse der Schweiz im Anschluss an den Meereshorizont. Bern 1902.
- [19] Jeanrichard F.: L'Office fédéral de topographie, de G.-H. Dufour à nos jours. VPK 4/88, p. 128
- [20] Kobold F.: Das europäische Dreiecksnetz (RETrig). Entstehung, Stand der Arbeiten. VPK 12/76, p. 333–338.
- [21] Matthias H.J.: Landestriangulation der Schweiz, Rückblick, Umschau und Vorschläge für die zukünftige Entwicklung. VPK 7/77, p. 221–229.
- [22] Matthias H.J.: Navigation. VPK 4/85, p. 109–122.
- [23] Poder K.: Report on the RETrig Subcommittee 1983–87. IUGG General Assembly, Vancouver, August 1987.
- [24] Rechenzentrum der L+T: Bulletin Nr. 4, Wabern 1980.
- [25] Rechenzentrum der L+T: Bulletin Nr. 6, Wabern 1982.
- [26] Rechenzentrum der L+T: Bulletin Nr. 12, Wabern 1987.
- [27] Rechenzentrum der L+T: Bulletin Nr. 15, Wabern 1987.
- [28] Reilly W.J.: Mündliche Mitteilung, Publikation in Vorbereitung.
- [29] Rosenmund M.: Die Änderung des Projektionssystems der schweizerischen Landesvermessung. Bern 1903.
- [30] Schneider D.: Erneuerung der Landestriangulation in der Westschweiz. Netz 1. und 2. Ordnung. Technischer Bericht, Wabern 1979.
- [31] Schneider D., Wunderlin N.: RAUMTRI, Dreidimensionale Netzausgleichung in einem geozentrischen kartesischen Koordinatensystem, Programmbeschreibung/Benutzeranleitung. Bericht Nr. 45 aus dem IGP, Zürich 1981.
- [32] Schürer M.: Die Reduktion und Ausgleichung des Schweizerischen Landesnivellements. Annexe aux procès-verbal de la 88me séance de la Commission Géodésique Suisse, Basel 1944.
- [33] Schweizerische Geodätische Kommission: Publikationen der Reihe «Das Schweizerische Dreiecksnetz», später «Astronomisch-geodätische Arbeiten in der Schweiz», heute «Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz». 1881 bis 1988, bisher 39 Bände.
- [34] Wiget A., Geiger A., Kahle H.-G.: Die Doppler-Messkampagne SWISSDOC: Ein Beitrag zur Landesvermessung in der Schweiz. VPK 2/85, p. 49–52.
- [35] Wiget A., Kahle H.-G., Geiger A.: ALGEDOP: Ein Beitrag zur satellitengestützten Geoidbestimmung in der Schweiz. VPK 5/86, p. 177–181.
- [36] Wolf R.: Geschichte der Vermessungen in der Schweiz. Zürich 1879.
- [37] Wunderlin N.: Die Mitarbeit der Schweiz am RETrig. VPK 12/76, p. 338–342.
- [38] Wunderlin N.: Versuche zur Refraktionsbestimmung mit Hilfe der Kollokation, FORTRAN-Programm REFKOL, Beschreibung und Gebrauchsanweisung. Bericht Nr. 132 aus dem IGP, Zürich 1987.
- [39] Zölly H.: Die Landestriangulation I.–III. Ordnung der Schweiz. Hundert Jahre Eidg. Landestopographie, Erinnerungsmappe, Bern 1938.
- [40] Zölly H.: Geschichte der Geodätischen Grundlagen für Karten und Vermessungen in der Schweiz. Wabern 1948.

Adresse der Verfasser:

Dipl.-Ing. H. Chablais
 Dipl.-Ing. E. Gubler
 Dr. phil. D. Schneider
 Dipl.-Ing. A. Wiget

Bundesamt für Landestopographie
 Seftigenstrasse 264
 CH-3084 Wabern

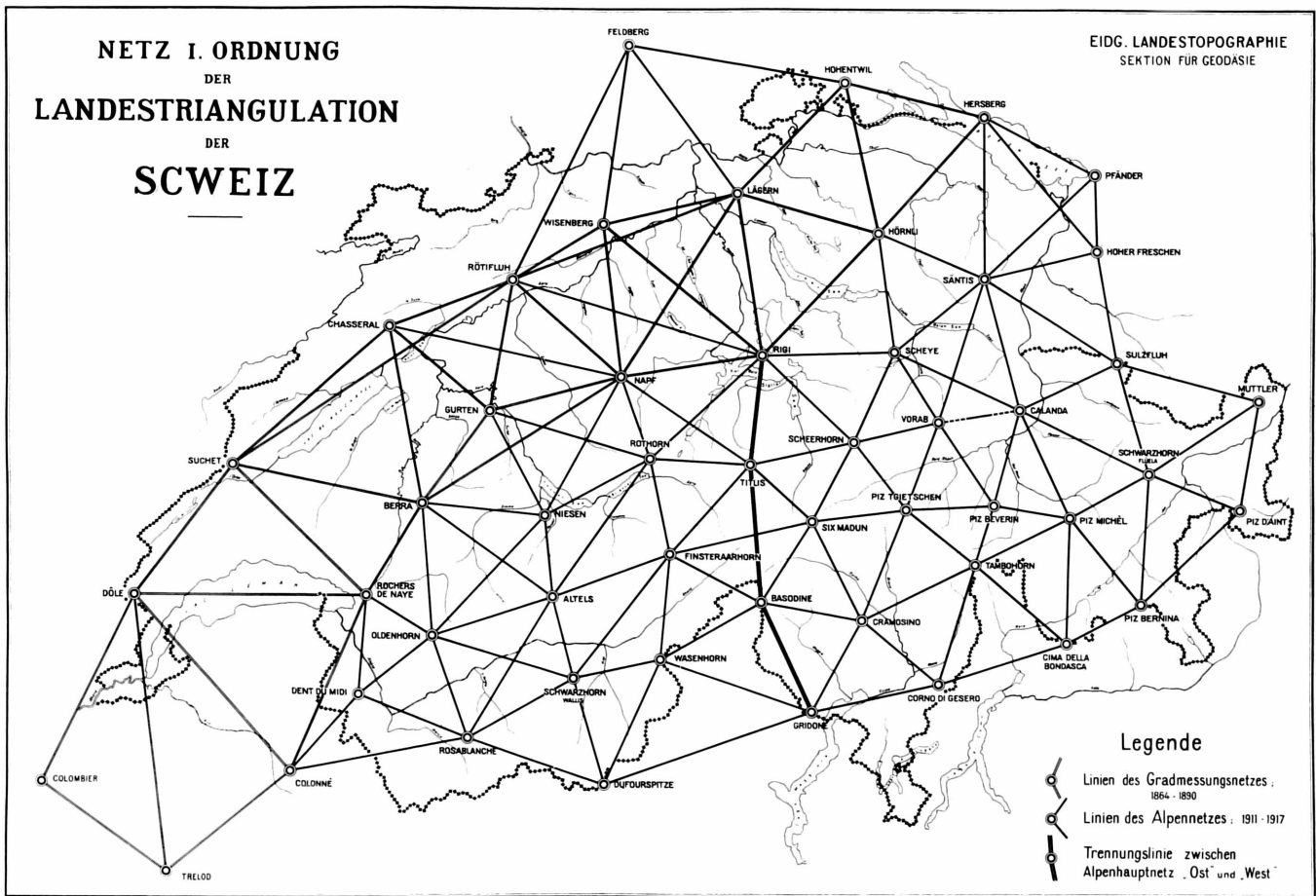


Abb. 1: Triangulationsnetz 1. Ordnung nach Zölly [40], p. 115

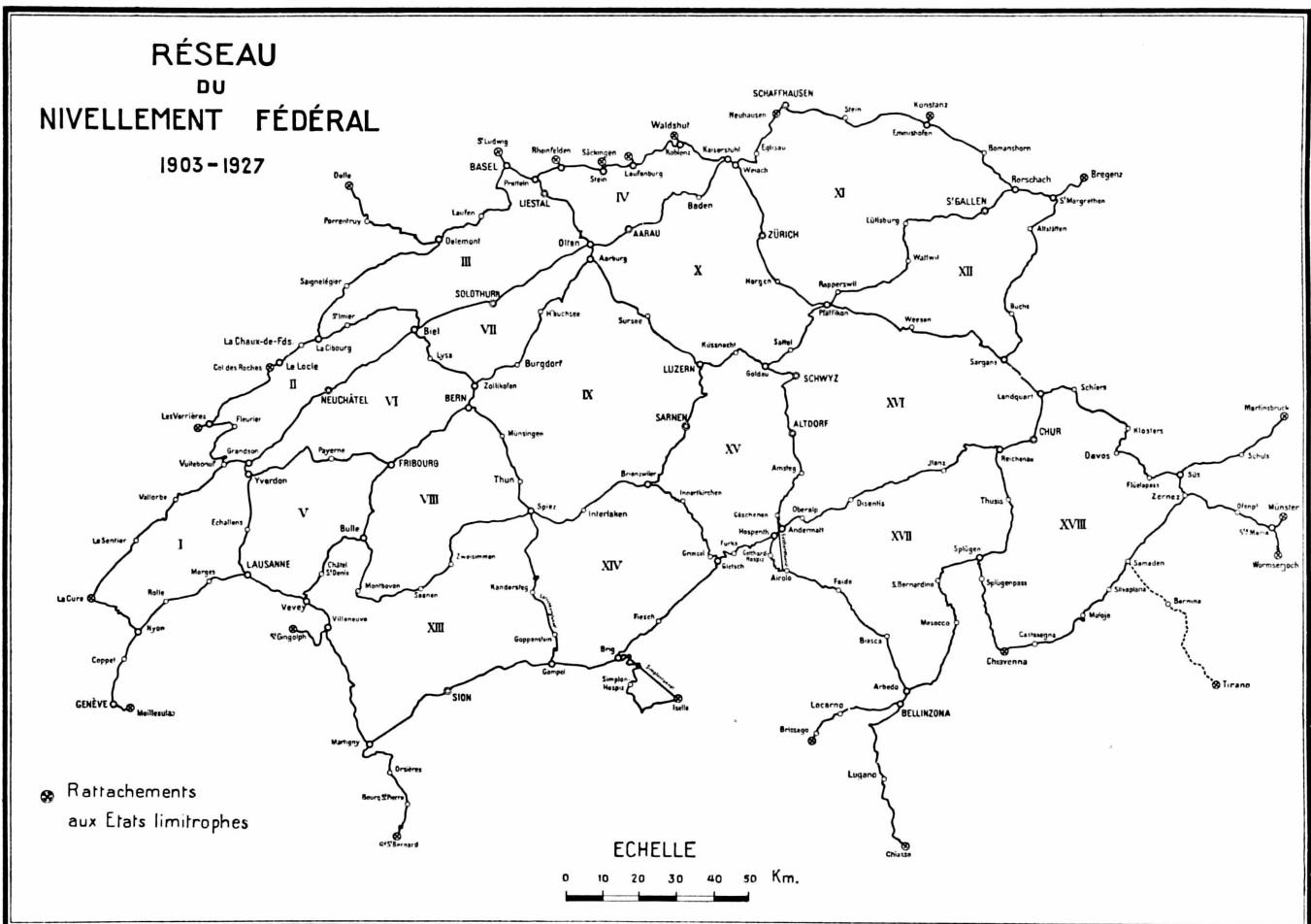


Abb. 2: Nivellementnetz 1903–1927 nach Zölly [40], p. 131