Meilensteine der Geschichte und Entwicklung der Schweizerischen Landesvermessung

Die moderne geodätische Landesvermessung der Schweiz stellt dem Geodaten-User den hochgenauen Bezugsrahmen (LV95) in effizienter Form als Referenznetze oder Positionierungsdienste zur Verfügung. Die Entwicklung des Fachgebiets wird mit einem historischen Rückblick aus heutiger Sicht analysiert und im Kontext mit Ereignissen und Errungenschaften von Wissenschaft und Messtechnik dargestellt. Dabei werden die Quantensprünge bei der Evolution der Bezugsrahmen sichtbar. Die Epoche der letzten 50 Jahre mit der Einführung der Elektronischen Distanzmessung, der Informatik sowie der satellitengestützten Messverfahren wird vertieft behandelt und ein Ausblick auf zukünftige Meilensteine gewagt.

La mensuration nationale géodésique moderne de la Suisse met à disposition de l'utilisateur de géodonnées le cadre de référence de haute précision (MN95) sous forme de réseaux de référence ou de services de positionnement. Le développement du domaine est analysé du point de vue actuel avec une rétrospective historique et est présenté dans le contexte des événements et des découvertes de la science et des techniques de mesure. Les sauts quantiques dans l'évolution du cadre de référence sont ainsi rendus visibles. L'époque des 50 dernières années avec l'introduction de la mesure de distance électronique, de l'informatique ainsi que des systèmes de mesure par satellites est traitée de façon approfondie et un regard vers les étapes futures est risqué.

La moderna misurazione nazionale geodetica della Svizzera mette efficacemente a disposizione dell'utente geodetico il quadro di riferimento ad alta precisione (MN95) sotto forma di rete di riferimento o servizi di posizionamento. Lo sviluppo del settore viene analizzato dal punto di vista attuale con una retrospettiva storica ed illustrato nel contesto con avvenimenti e traguardi ottenuti dalla scienza e dalla tecnica di misurazione. In tal modo si evidenziano i salti quantici intercorsi nell'evoluzione del quadro di riferimento. L'epoca degli ultimi cinquant'anni, con l'introduzione della misurazione elettronica a distanza, dell'informatica, così come dei sistemi di misurazione satellitari, viene descritta in modo approfondito e una visione delle future pietre miliari viene abbozzata.

D. Schneider, E. Gubler, A. Wiget

1. Vermessungsgeschichte aus neuer Perspektive

In der Fachliteratur findet sich eine Vielzahl von Quellen zur Geschichte der Schweizerischen Landesvermessung (LV). Der Astronom und Mathematiker Rudolf Wolf publizierte 1879 eine umfassende «Geschichte der Vermessungen in der Schweiz» [1] bis zum ausgehenden 19. Jahrhundert. Der ehemalige Leiter der Geodäsie bei der Eidg. Landestopographie (L+T), Hans Zölly, stellte die ausführliche Vorgeschichte und den Stand der geodätischen Landesvermessung (LV03) nach dem 2. Weltkrieg in seiner «Geschichte der Geodätischen Grundlagen für Karten und Vermessungen in der Schweiz» [2] im Detail dar. Kürzlich erschien ein umfassendes Werk, in welchem sich Martin Rickenbacher [3] mit den Arbeiten der französischen Ingenieurgeografen in der Schweiz (1798–1815) intensiv auseinandersetzt. In dieser Zeitschrift (bzw. in Vorgängerausgaben) sind bei Rückblicken im Zusammenhang mit Jubiläen zudem diverse Zusammenfassungen der Geschichte der LV, der Topographie und Kartographie erschienen.

Zur neueren Entwicklung des Fachgebiets in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts liegt eine Vielzahl von Einzelberichten vor. Wissenschaftliche Arbeiten sind zudem in den Publikationsreihen der Schweizerischen Geodätischen Kommission (SGK) und in Technischen Berichten und Dokumentationen des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich (IGP) und des Bundesamtes für Landestopografie (swisstopo) festgehalten. Es fehlt jedoch bis heute eine umfassende Darstellung dieser Epoche der Entwicklungsgeschichte.

Die Autoren dieses Beitrags hatten das Glück, die Entwicklung der modernen Geodäsie seit Ende der 1960er-Jahre hautnah mit zu erleben. Im Geodäsie-Team von swisstopo waren sie einerseits Pioniere und Geburtshelfer der neuen Landesvermessung (LV95), anderseits wurden sie zuweilen auch als Totengräber der alten LV03 betrachtet. Die Gesellschaft für die Geschichte der Geodäsie in der Schweiz (GGGS) hat sie als Zeitzeugen eines markanten Meilensteins der neuen Technikgeschichte beauftragt, ihre Erkenntnisse im Rahmen eines Projekts der «Arbeitgruppe LV» zu dokumentieren. Anstelle einer klassischen Retrospektive der LV-Geschichte der letzten 200 Jahre auf Grund vorhandener Quellen, stellen die Autoren die Entwicklung ausgehend vom aktuellen Stand (LV95) aus heutiger Sicht im Rückblick dar.

Die Technologie hat sich in der Vergangenheit keineswegs linear und stetig fortentwickelt. Vielmehr verlief die Entwicklung in Episoden mit prägnanten Quantensprüngen. Diese Meilensteine der technischen Evolution werden hervorgehoben und sichtbar gemacht. Dabei werden die «kausalen» Zusammenhänge mit dem geschichtlichen und kulturellen Umfeld, der Technikgeschichte allgemein, der Entwicklung der geodätischen Wissenschaft und der LV im Speziellen sichtbar. Der Fokus dieses Beitrags liegt vor allem auf der bisher in der Fachliteratur

wenig beschriebenen revolutionären technologischen Entwicklung des Fachgebiets von den 1960er-Jahren bis heute. Im vorliegenden Beitrag wird der Terminus «Landesvermessung (LV)» auf den Begriff der geodätischen LV, ohne Topografie, Kartografie und Amtliche Vermessung (AV) beschränkt. Die wichtigen Teilaspekte der Höhenbezugsrahmen (Landesnivellements / Höhennetze) sowie der Schwerefeld- und Geoidbestimmung in der Schweiz können leider aus Platzgründen in diesem Beitrag nicht behandelt werden.

Als Indikator für die progressive Qualitätssteigerung der LV eignet sich das Kriterium der relativen Genauigkeit der jeweils verfügbaren lokalen Bezugsrahmen. Ausgehend von der aktuellen LV95, deren Koordinatensätze als quasi fehlerfrei angenommen werden, lassen sich die Felder identischer Punkte von älteren Bezugsrahmen mit Hilfe von Transformationen nach der Methode der kleinsten Quadrate untersuchen. Die relativen mittleren Koordinatenfehler können so abgeschätzt und zur Beurteilung der Qualität der Bezugsrahmen ausgewiesen werden. Eine weitere Möglichkeit zur Genauigkeitsanalyse besteht darin, ältere geodätische Netze mit moderner Ausgleichungssoftware streng auszugleichen («Diagnoseausgleichung»). Dabei können sowohl die mittleren Fehler (empirischen Standardabweichungen) der Beobachtungen wie auch jene der ausgeglichenen Koordinaten geschätzt werden. Die Methode ist sehr aufwändig, da die umfangreichen Originalbeobachtungsdaten erfasst werden müssen. Sie erlaubt aber zusätzlich interessante Schlüsse zur Qualität der damals verwendeten Berechnungsmethoden.

2. «State of the Art» der Landesvermessung

Die geodätische LV stellt aktuelle Georeferenzdaten des Bundes als geometrische und gravimetrische Grundlage für sämtliche Geobasisdaten der Nationalen Geodaten-Infrastruktur (NGDI) und die daraus abgeleiteten Vermessungen bereit. Die Aufgaben der LV umfassen die Definition des nationalen geodätischen Bezugssystems und das Erstellen, Nachführen und Verwalten der landesweit hochpräzisen dreidimensionalen Bezugsrahmen. Diese werden in Form von Grundlagennetzen mit Lage-, Höhen- und dreidimensionalen Fixpunkten sowie Schwerestationen und GNSS-Permanentstationen realisiert.

Mit den rasanten Entwicklungen in der Elektronik, Informatik und Telekommunikation wurden die Technologien zur Erhebung der Geodaten seit Mitte des 20. Jahrhunderts revolutioniert. Ebenso verändert haben sich in jüngster Zeit die Methoden der Verwaltung und Verbreitung der Geodaten, beispielsweise mittels moderner Geodienste.

Die LV soll sowohl bezüglich Genauigkeit als auch Verfügbarkeit die aktuellen Bedürfnisse der Kunden zufriedenstellen. Als Grundlage für alle Vermessungen muss der geodätische Bezugsrahmen stabil und genau sein, genauer als die in der Vermessung (üblicherweise) eingesetzten Messverfahren. Die Referenz muss einfach zugänglich bzw. verfügbar sein, damit die Vermessungen mit modernen Messinstrumenten effizient durchgeführt werden können.

swisstopo hat auf diese Entwicklungen frühzeitig mit dem Aufbau des Landesvermessungswerkes 1995 (LVW95) reagiert. Dessen Komponenten werden in diesem Bericht teilweise näher erläutert (vgl. Kap. 3.5, 4.5 und 4.6).

Ein wichtiges Element des LVW95 ist der landesweit cm-genaue Bezugsrahmen LV95. Dieser wird einerseits durch ca. 200 stabil vermarkte Referenzpunkte realisiert, deren Koordinaten und Höhen mit satellitengeodätischen Methoden mindestens alle sechs Jahre neu gemessen werden. Andererseits wird der Bezugsrahmen durch die 31 Permanentstationen des Automatischen GNSS Netzes der Schweiz (AGNES) bestimmt.

Die GNSS-tauglichen und gut zugänglichen LV95-Punkte sind als «Fixpunkte» passive Referenzpunkte, auf denen bei Bedarf Vergleichs- oder Anschlussmessungen gemacht werden können. Viele dieser Punkte sind auch an das Landesnivellement angeschlossen und bilden so die Verknüpfung zum Landeshöhennetz LHN95. Die sorgfältige Auswahl und Materialisierung der LV95-Punkte sowie die Dichte des Netzes erlauben auch geotechnische Untersuchungen und die Bestimmung eines kinematischen Modelles der Krustenbewegungen der Schweiz.

Nebst der landesweit hohen Genauigkeit ist vor allem auch die zeitgemässe Verfügbarkeit des geodätischen Bezugsrahmens von grosser Bedeutung. Diese wird durch die kontinuierlichen Messungen auf den AGNES-Stationen ermöglicht. Deren Lage- und Höhenkoordinaten werden im Verbund mit europäischen und weltweiten GNSS-Stationen laufend bestimmt bzw. überwacht und gewährleisten die Kompatibilität mit den weltweit verbreiteten Referenzsystemen sowie den von den Navigationssatelliten ausgesandten Daten. Denn für die satellitengeodätischen Messmethoden, die in der Vermessung und zunehmend auch in der Bauindustrie, ja sogar in der Landwirtschaft eingesetzt werden, ist die «maschinentaugliche» Zugänglichkeit der Referenzdaten für hochgenaue GNSS-Messungen unerlässlich. Dieses Bedürfnis deckt swisstopo mit dem Positionierungsdienst swipos® ab, mit welchem schweizweit GNSS-basierte Vermessungen und Positionsbestimmungen im Bezugsrahmen LV95 in Echtzeit mit cm-Genauigkeit durchgeführt werden.

Unter anderem mit dem Bezugsrahmen LV95 und swipos® verfügt die Schweiz über eine moderne, die heutigen und in naher Zukunft zu erwartenden Bedürfnisse abdeckende geodätische Infrastruktur.

3. Historischer Rückblick aus heutiger Sicht

3.1 «LV1800» Landesvermessung in der Helvetik

Bis weit in die Neuzeit sind genaue Entfernungsmessungen beinahe unmöglich. Distanzen werden im Schrittmass oder in Stunden angegeben. Winkelmessungen sind deutlich genauer. Und so liegt es nahe, im ebenen Gelände eine kürzere

Strecke möglichst genau zu messen und deren Massstab mit Trigonometrie auf alle Seiten im Dreiecksnetz zu übertragen.

Bis gegen Ende des 18. Jahrhunderts gibt es in der Schweiz nur ein einziges «Konzept zur (geodätischen) Landesvermessung», formuliert von Micheli du Crest im Jahre 1754 [3]. Erst um 1790 beginnen Tralles und Hassler mit geodätischen Messungen. Sie verwenden einen Bordakreis (von Cary) von 16 Zoll und einen Spiegelsextanten mit einem Teilkreis von 5 Zoll. Eine Basis (Grundlinie) bei Thun und trigonometrische Messungen dienen zur Bestimmung der Höhen der bekannten Berner Alpengipfel [3]. Im Berner Seeland wird 1791 eine 13 km lange Basis gemessen. Verwendet wird eine 100 französische Fuss lange Stahlkette. 1797 wird die Messung mit 7.8 m langen Eisenstangen wiederholt [3]. Im Zürcher Sihlfeld misst Johannes Feer eine 3.4 km lange Basis [3]. Diesen Geodäten ist durchaus bewusst, welche Bedeutung eine genaue LV für die Schweiz hat. Aber in der Zeit der Helvetischen Republik, nach dem Einmarsch von Napoleons Truppen, sind die Verhältnisse viel zu instabil, um mehrjährige und kostspielige Projekte dieser Art erfolgreich durchzuführen. Immerhin entsteht um 1800 ein Verzeichnis mit Längen und Breiten von 51 Punkten [3]. Dieser erste Bezugsrahmen LV1800 kann dank zehn vermessenen historischen Bauten grob mit LV95 verglichen werden (s. Zeitstrahl).

Grosse Teile der Schweiz werden zu Napoleons Zeiten von französischen Ingenieurgeografen vermessen [3]. Die Schweizer Behörden ziehen die Zusage zur Zusammenarbeit wieder zurück.

Auch in der Zeit des Staatenbundes, nach 1815, gelingt es lange nicht, von der Tagsatzung die benötigen jährlichen Mittel zu erhalten, um ein landesweites Netz aufzubauen. Zwar kann das trigonometrische Netz um die Basis im Berner Seeland erweitert und mit jenem verbunden werden, dessen Massstab auf der Basis im Sihlfeld beruht. Der Massstabsunterschied von $3 \cdot 10^{-4}$ entspricht allerdings nicht den Erwartungen [2,4]. Später zeigt sich, dass die Abweichung auf unterschiedliche Basis-Massstäbe zurückzuführen ist. Der Ruf nach einer genauen, zuverlässigen Schweizer Karte wird immer lauter. Dies setzt aber auch ein landesweites trigonometrisches Netz voraus, das nicht vom Fleck kommt.

3.2 «LV1840» Triangulation primordiale

Erst in der Regenerationszeit ab 1830 können die Arbeiten ausreichend finanziert und zügig vorangetrieben werden [2]. Dies gelingt nur dank einigen sehr motivierten und erfahrenen Geodäten wie dem zum Oberstquartiermeister gewählten Guillaume Henri Dufour. Die bereits bestehenden Netze und sowohl die Basis im Seeland wie auch jene im Sihlfeld werden einbezogen und nochmals neu gemessen. Weil die Ablesungen am Teilkreis noch zu ungenau sind, werden die Winkel ausschliesslich mit Repetitionstheodoliten mit zehn Wiederholungen gemessen. Die Teilkreise haben Durchmesser von 7 bis 12 Zoll (Abb. 1).

Die Dreiecksschlüsse sollen in allen Dreiecken unter 3" liegen. Eine besondere Herausforderung stellt der Übergang vom Mittelland in die Südschweiz dar, der früher nie gelungen ist. In der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts sind die Alpen touristisch noch nicht erschlossen. Es gibt keine genauen Karten, die es erlauben würden, Netzentwürfe oder auch Anmarschwege zu den Gipfeln festzulegen. Für die Geodäten und ihre Gehilfen bedeuten diese Umstände unglaubliche, wochenlange Strapazen, die sie auch in Lebensgefahr bringen. So erschlägt 1832 ein Blitz auf dem Säntis den Gehilfen im Biwak, der Geodät wird lebensgefährlich verletzt [5]. Die Messungen ziehen sich unter diesen Umständen bis 1839 hin. Die Ausgleichung des Netzes erster Ordnung erfolgt anschliessend und wird von Eschmann ausführlich dokumentiert sowie als *Triangulation primordiale* publiziert [5]. Eschmann schreibt: «Das trigonometrische Netz der Schweiz besteht aus fünf abgesonderten, verschiedenen Zeiträumen und Beobachtern angehörenden Dreiecksketten». Und so erfolgt auch die Berechnung der Koordinaten. An eine strenge Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate ist noch nicht zu denken.

Abb. 1: Theodolit von Reichenbach 12 Zoll (Foto: swisstopo).

Wenn das Netz 1. Ord. heute anhand der von Martin Rickenbacher erfassten Daten in einem Guss ausgeglichen wird, zeigen sich die Schwächen deutlich. Die grössten Fehler werden im Dreieck Niesen-Gumfluh-Berra festgestellt, in dem der Dreiecksschluss 34" oder 10 mgon vom Soll abweicht [5]. Es handelt sich um eine der ältesten Dreiecksketten. Auf vielen TP im Hochgebirge kann nicht stationiert werden. In diesen Dreiecken können die Dreiecksschlüsse gar nicht kontrolliert werden und so bleiben wohl einige gröbere Fehler in den Messungen, in den Zentrierungen oder in den Punktidentitäten unentdeckt. Die neue Ausgleichung ergibt mit diesen – bisher nicht erklärbaren Unstimmigkeiten – für einige TP Verschiebungen von mehr als 20 m. Der Vergleich der Koordinaten von 15 wahrscheinlich identischen TP mit den Koordinaten der LV1890 ergibt einen mittleren Punktfehler von 5 m (bzw. 6 m/100 km; s. Zeitstrahl).

Ergebnis: Der Bezugsrahmen LV1840 ist zwar inhomogen und hat stellenweise noch grosse Schwächen, denn er stammt aus verschiedenen, sehr ungleichen Quellen. Aber er kann durchaus als Grundlage

für die Erstellung von Karten im Massstab 1:100 000 verwendet werden. Da spielt es wohl keine Rolle, wenn ein Gebiet um 1/10 mm verschoben dargestellt wird.

3.3 «LV1890» Gradmessungstriangulation der SGK

1861 lädt der preussische General J. J. Baeyer die Schweiz ein, sich an der Mittel-Europäischen Gradmessung zu beteiligen. Das gibt den Anstoss zur Gründung der Schweizerischen Geodätischen Kommission (SGK) [1]. Als neues Ziel dieser Kampagne soll auch das Geoid, insbesondere im Alpenraum, bestimmt werden. In der SGK wird bald klar, dass die Triangulation primordiale den Anforderungen einer wissenschaftlichen Kampagne nicht genügt. Bedenken bestehen sowohl bezüglich der Stabilität der TP, soweit sie überhaupt noch vorhanden sind, als auch der Qualität der Messungen und der Ausgleichungsmethode. Das Netz soll revidiert, schwache Teile neu gemessen und ein geeigneterer Alpenübergang gesucht werden, bei dem auf allen Punkten gemessen werden kann. Die Winkelmessungen ziehen sich bis 1879 hin [6].
Zudem werden 1880/81 bei Aarberg, Weinfelden und Giubiasco neue Basen von 2 bis 3 km Länge gemessen, um dem Netz einen sicheren Massstab zu geben. Verwendet wird ein spanischer Basis-Messapparat (Abb. 2), der für diese Strecken eine Standardabweichung von 1 mm verspricht. Allerdings kann die Genauigkeit nicht vollständig auf die Dreieckseiten der Gradmessungstriangulation übertragen werden. Das Basisvergrösserungsnetz Weinfelden ist ungünstig geformt und in Giubiasco beeinflussen die grossen Lotabweichungen die steilen Visuren [6].

Abb. 2: Messung mit dem spanischen Basis-Messapparat, Aarberg, 1880 (Foto: swisstopo).

Für die Lagerung des Netzes und für die Geoidbestimmung werden auf den Sternwarten und auf gut zugänglichen TP astronomische Beobachtungen durchgeführt. Als grösstes Problem stellt sich die zur Längenbestimmung benötigte Zeitübertragung über Telegrafenleitungen heraus.
Die im Jahre 1890 publizierten Resultate des Schweizer Anteils des Gradmessungsnetzes können sich sehen lassen [6]. Die Genauigkeit 1σ einer Richtung aus der Stationsausgleichung erreicht 0.9" oder 0.28 mgon [6]. Wird das Netz mit heutigen Mitteln, unter Berücksichtigung der heute bekannten Lotabweichungen und mit den Basisvergrösserungsnetzen in einem Guss ausgeglichen, ergibt sich sogar eine noch höhere Genauigkeit von 0.18 mgon [7].
Die Distanzen im Bezugsrahmen LV1890 sind gegenüber LV95 im Mittel nur 3.5 ppm zu klein, die Koordinaten der TP südlich der Alpen liegen maximal eineinhalb Meter falsch.

3.4 «LV03» Landestriangulation der Eidg. Landestopographie (L+T)

Anfangs des 20. Jahrhunderts wächst der Bedarf nach genauen Vermessungsgrundlagen stark an, vor allem für die AV. Nun stellt sich die Frage, ob LV1890 den Anforderungen genügt. Aus praktischen und zeitlichen Gründen wird beschlossen, das inzwischen über das ganze Land ausgedehnte Netz der SGK zu verwenden, obwohl Prof. Baeschlin von der ETH (und der junge Ingenieur Zölly) davon abraten [2]. Aus diesem Grund stützt sich der Bezugsrahmen LV03 zum grossen Teil auf LV1890 ab. Nur im Alpenraum müssen die grossen Lücken in LV1890 gefüllt werden (Graubünden, Berner Oberland und Wallis). Für diese Arbeiten werden Theodolite mit Schrauben-Mikrometern von Hildebrand eingesetzt. Weil grosse Netzteile von LV1890 übernommen werden, sind auch in LV03 die Distanzen im Mittel um 3.5 ppm zu klein. Dank dem neu gemessenen Netz über die Alpen, sind auf der Alpensüdseite die Koordinaten von LV03 etwas genauer als bei LV1890. Die Abweichungen erreichen selten einen Meter.
Lange Zeit sind die Netzschwächen kein grosses Problem. Die Zwänge treten an Orten auf, wo sie nicht festgestellt werden oder nicht stören. Vor allem in bewaldeten Gebieten, wo der ursprüngliche Netzaufbau schwach ist, zeigen die ab 1970 immer häufiger eingesetzten elektronischen Distanzmessungen (EDM) Netzzwänge erbarmungslos auf. Die Berechnungsmethode mit Einzelpunkt- oder kleinen Mehrpunktausgleichungen verdrängt die Zwänge an Orte, wo sie nicht entdeckt werden. Rückblickend muss festgestellt werden, dass den Geodäten die Zeit fehlte, um der Gesellschaft rechtzeitig einen Bezugsrahmen bereitzustellen, der den Anforderungen längerfristig genügt hätte. Deshalb hat swisstopo den heute geltenden Bezugsrahmen LV95 so früh wie möglich und mit Hochdruck begonnen und bereitgestellt.

3.5 «LV95»: GNSS-Referenznetz und Positionierungsdienst swipos® als Teile des Landesvermessungswerks LVW95

Die Entwicklungen auf dem Gebiet der Satellitengeodäsie (vgl. Kap. 4.4) öffnen für die LV ein breites Feld neuer Möglichkeiten und Bedürfnisse. Die Ziele und Anforderungen an eine moderne LV werden seitens swisstopo mit dem Landesvermessungswerk LVW95, welches von 1988 bis 1995 aufgebaut und seither vervollständigt wurde, erfüllt. Es sind dies [8,9]:

- Die Definition zweier zeitgemässer, nationaler geodätischer Bezugssysteme: CHTRS95 in enger Anlehnung an die internationalen, global gelagerten Bezugssysteme (insbes. ETRS89) sowie CH1903+ unter Beibehaltung des in der Schweiz gebräuchlichen Projektionssystems als Basis für die AV und die Nationale Geodaten-Infrastruktur (NGDI).
- Die Herstellung des Bezuges der lokalen (nationalen) Systeme und Netze zu globalen (internationalen) geodätischen Bezugssystemen und Bezugsrahmen durch den Betrieb der Fundamen-

talstation Zimmerwald (gemeinsam mit dem AIUB), welche in internationale Referenznetze eingebunden ist sowie durch Anschlussmessungen an die globalen Bezugsrahmen; die Bestimmung aktueller Transformationsparameter.

- Der Aufbau eines terrestrischen 3D-Bezugsrahmens zur Realisierung der Bezugssysteme durch wiederholte GNSS-Messungen hoher Genauigkeit und Zuverlässigkeit auf gut zugänglichen, stabil vermarkten Referenzpunkten (Landesnetz LV95 bzw. CHTRF) sowie durch kontinuierliche GNSS-Messungen auf Permanentstationen (AGNES); die Bestimmung der 3D-Koordinaten und deren Kovarianz; die Erfassung der Bewegungen der obersten Erdkruste in Raum und Zeit durch wiederholte Vermessung geeigneter Punktfelder; die Bestimmung von Zeitreihen sowie des Geschwindigkeitsfeldes und des kinematischen Modelles der Schweiz CHKM95.
- Die zeitgemässe Bereitstellung und Verfügbarkeit der Daten der LV durch Geodienste: Die Koordinaten, Höhen und Schweren sowie allenfalls Geschwindigkeiten der geodätischen Referenzpunkte werden von swisstopo im Fixpunkt-Datenservice (FPDS) gemeinsam mit den Kantonen verwaltet und über einen Visualisierungsdienst im Internet bereitgestellt; die Messungen der GNSS-Permanentstationen (AGNES) werden durch den Positionierungsdienst swipos® verbreitet und als Georeferenzdaten für alle Echtzeit-Vermessungen in der Schweiz sowie für nachträgliche Auswertungen verfügbar gehalten.
- Die Verknüpfung mit Netzen der bisherigen LV *
- Der Aufbau des Landeshöhennetzes LHN95 als nationaler Höhenbezugsrahmen *
- Die Berechnung eines genauen Geoidmodells *
- Die Erneuerung des Landesschwerenetzes *

**) Teile des LVW95, welche in diesem Beitrag aus Platzgründen nicht eingehend beschrieben werden.*

Mit dem Bundesgesetz über Geoinformation (GeoIG), der Geoinformationsverordnung (GeoIV) und der Landesvermessungsverordnung (LVV), welche seit dem 1. Juli 2008 in Kraft sind, sind die rechtlichen Grundlagen des LVW95 geschaffen. Darin ist auch festgelegt, dass der neue Bezugsrahmen LV95 bis Ende 2016 für alle Georeferenzdaten eingeführt werden muss.

4. Technologische Revolution der letzten 50 Jahre

4.1 Epoche der Elektronischen Distanzmessung (EDM)

Grundprinzip der EDM und erste Geräte

Die Anwendung der Triangulation, der klassischen Methode der LV aus dem 18./19. Jahrhundert, erfährt bis in die 1950er-Jahre keine grundlegenden Veränderungen. Erst Jahrzehnte nach dem 2. Weltkrieg ist die Zeit reif für einen Aufbruch in der LV. Elektronik, Funktechnik und Informatik haben inzwischen mit der Entwicklung des Radars, des Lasers und des Computers neue Voraussetzungen geschaffen. Die EDM, welche die direkte Messung von Dreiecksseiten mit Hilfe von elektromagnetischen Wellen ermöglicht, löst eine erste technische Revolution im Vermessungswesen aus.

Das Grundprinzip der EDM geht historisch auf die experimentelle Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit (Fizeau's Experiment) [10] zurück. Ein Lichtstrahl wird über eine bekannte Strecke **d** gesandt, an deren Ende an einem Spiegel reflektiert und zum Sender zurückgeschickt. Aus der gemessenen Laufzeit des Lichtstrahls Δt folgt schliesslich die Lichtgeschwindigkeit

$$c = 2\,d / \Delta t\ .$$

Der Physiker Erik Ö. Bergstrand (1904-1987) vom Nobel Institute of Physics, Stockholm, schlägt die Umkehrung des Verfahrens vor, um aus der Gleichung mit der Naturkonstanten **c** die unbekannte Distanz d zu bestimmen. Er wendet sich an die schwedische Firma AGA, welche 1953 auf dieser Basis das erste elektrooptische EDM-Gerät AGA Geodimeter NASM-1 auf den Markt bringt.

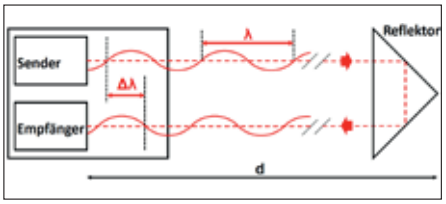


Abb. 3: Prinzip der EDM mit Phasenmessung.

Das Gerät nutzt weisses Licht als Träger, das in der Sendeoptik durch eine Kerr-Zelle geschickt und mit einem Mess-Signal der Wellenlänge λ moduliert wird. In der Empfangsoptik wird das reflektierte Licht auf eine Photozelle geworfen, das elektrische Signal schliesslich mit dem Modulationssignal verglichen und die Phasenverschiebung $\Delta\lambda$ gemessen. Damit ergibt sich die gesuchte Distanz (Abb. 3):

$$d = n\,\lambda/2 + \Delta\lambda/2\ .$$

Durch die Wiederholung der Messung mit mehreren Messsignalen von unterschiedlicher Wellenlänge, können die ganzzahligen Vielfachen **n** (Mehrdeutigkeiten oder ambiguities) schliesslich berechnet werden.

Da die Lichtausbreitung nicht mit der Geschwindigkeit **c** im Vakuum sondern in der Atmosphäre stattfindet, werden Geschwindigkeitskorrektionen in Funktion der Brechungsindizes der Luft an den Messwerten angebracht. Der Brechungsindex hängt in erster Linie von der Lufttemperatur, dem Luftdruck und der Luftfeuchtigkeit auf dem Lichtweg ab (Tab. 2). Die Möglichkeiten der Bestimmung dieser Atmosphärenparameter sind begrenzende Faktoren der EDM-Messgenauigkeit. Gerätemassstab und Nullpunktkorrektionen (Additions- / Reflek-

Abb. 4: Tellurometer M/RA1 (Foto: NOAA).

torkonstante) werden mit Frequenz- bzw. Kalibrierungsmessungen bestimmt und an den Messresultaten angebracht. Für eine ausführliche Einführung in die Theorie der EDM sei auf weiterführende Fachliteratur [11,12] verwiesen.

Parallel zur Entwicklung des Geodimeters wird in Südafrika an einem Mikrowellen-Gerät gearbeitet, welches auf dem gleichen Messprinzip basiert, aber als Träger ein Mikrowellensignal im cm-Wellenbereich verwendet. Der Elektroingenieur und Radarpionier Trevor L. Wadley (1920–1981) vom National Institute of Telecommunication Research in Südafrika bringt 1956 den Mikrowellen-Distanzmesser Tellurometer M/RA1 (Gerätepaar mit unterschiedlichem Master/Remote-Gerät) auf den Markt (Abb. 4) [13].

Während erste Anwendungen der EDM mit Geodimeter- und Tellurometer-Geräten in Kanada, den USA und Australien schon in den 1950er-Jahren erfolgen, dauert es in Europa etwas länger bis die Methode in der Praxis Einzug hält. Grund für die späte Nachfrage nach der neuen Technik ist die Tatsache, dass hier seit den 1930er-Jahren gute geodätische Grundlagennetze zur Verfügung stehen.

Die ersten Tests mit einem Tellurometer in der Schweiz finden 1958 auf dem Jungfraujoch statt (Abb. 5). Dabei wird eine ca. 15 km lange Distanz vom Sphynx-Observatorium über den Aletsch-Gletscher zum Märjelensee durch die Organisatoren der Internationalen Glaziologischen Grönlandexpedition EGIG erfolgreich gemessen [13,14]. Die Expedition vermisst im darauf folgenden Jahr ein Ost-West-Profil (Viereckskette / Polygonzug) in Grönland mit Beteiligung von Schweizer Geodäten mit Tellurometer M/RA1-Geräten.

Zu Beginn der 1960er-Jahre wird die Mikrowellen-EDM wegen ihrer grossen Reichweite und der Unabhängigkeit von den Wetter- und Sichtbedingungen gegenüber dem elektrooptischen Verfahren in der LV vorgezogen. Der Messstrahl wird durch die Parabolantenne nur schwach gebündelt (Öffnungswinkel ~10°), was die Aufnahme der Richtstrahlverbindung durch Ausrichten der Antennen erleichtert. Zwischen Master- und Remotestation besteht zudem Sprechfunk-Kontakt. Durch die Strahl-Divergenz entsteht allerdings die Gefahr, dass je nach Längenprofil der Strecke Bodenreflexionen auftreten, die sich den direkten Messwellen überlagern und die Messresultate verfälschen. Im Unterschied dazu verwenden die ersten Geodimeter weisse Lichtquellen, welche bei guter Sicht nur Messungen beschränkter Reichweite von wenigen km erlauben. Mit Quecksilberdampflampen nachts, ohne das störende Tageslicht, werden etwas längere Reichweiten erzielt.

Die Firma WILD Heerbrugg erkennt die Zeichen der Zeit früh und entwickelt zusammen mit der Elektronikfirma Albiswerk Zürich ebenfalls ein Mikrowellen-Distanzmessgerät, den WILD Distomat DI 50 (Abb. 6). Dieses kommt ab 1963 zum Einsatz.

Abb. 5: Erste EDM in der Schweiz mit Tellurometer M/RA1 auf Jungfraujoch, 1958 (Foto: Tellurometer Ltd., UK).

Abb. 6: WILD Distomat DI 50 (Foto: www.wild-heerbrugg.com).

Anfänge der EDM in der Schweiz

Das um 1950 in Europa lancierte *«Réseau Européen des Triangulations, RETRIG»* hat zum Ziel, die Landesnetze aller Staaten zu verbinden. Die International Association of Geodesy IAG setzt zu diesem Zweck eine RETRIG-Kommission mit der Aufgabe ein, die nationalen Netze für internationale Aufgaben und Forschungszwecke vergleichbar zu machen und in einem einheitlichen Bezugssystem auszugleichen. Die SGK und swisstopo sind mit den Partnerorganisationen der Nachbarländer ins Projekt eingebunden. Bei den RETRIG-Ausgleichungen zeigen sich Unterschiede in den Massstäben der Landesnetze von Deutschland, Österreich und der Schweiz, weshalb die Netzmassstäbe im Bodenseegebiet mittels neuer Messungen überprüft werden sollen. Die *«Basis Heerbrugg»* [15], eine geodätische Basis (Basispolygon von 7.13 km auf dem Rheindamm), wird 1959 durch Invardraht-Messungen hoher Genauigkeit (σ = 3 mm) bestimmt. Ein Basisvergrösserungsnetz (BVN) überträgt den Basis-Massstab auf die Dreiecksseiten der drei Landesnetze im Bodenseegebiet. Das Netz dient daneben der praktischen Erprobung der neuen EDM-Verfahren.

An ihrer Sitzung vom 20. April 1963 beschliesst die SGK, die Länge einiger Seiten der Triangulation 1. Ord. mit EDM-Geräten zu messen und damit erste eigene Erfahrungen mit der neuen Messmethode zu sammeln [16]. Die Testmessungen werden 1963 in Zusammenarbeit mit dem DGFI in Angriff genommen. Das Projekt steht unter der Regie des Institutsleiters des IGP, Prof. Fritz Kobold, der gleichzeitig als Präsident der SGK amtiert. Der wissenschaftliche Mitarbeiter und Geodät, Werner Fischer, wird mit der Leitung der Kampagnen betraut.

Anlässlich der ersten Messkampagne vom 8. bis 17. Oktober 1963 werden 18 Distanzen aus dem Netz 1./2. Ord. mit

der Dreieckskette Lägern-Hohentwiel-Hörnli-Hersberg-Säntis-Pfänder gemessen. Das Testgebiet umfasst damit auch die Seite Säntis-Pfänder des BVN Heerbrugg, womit Vergleichswerte von hoher Qualität zur Verfügung stehen. Neben einem Gerätepaar Tellurometer M/RA1 kommen auch zwei neue Distomat DI 50 der Firma WILD Heerbrugg zum Einsatz.

Die Ergebnisse erlauben eine erste Beurteilung der erreichbaren Genauigkeit der Mikrowellen-EDM. Die Einflüsse von Bodenreflexionen der Mikrowellen und die Variation der Brechungsindizes der Luft auf der Messlinie werden als kritische Ursachen von systematischen Messfehlern deutlich erkannt. Weitere EDM der SGK/ETHZ in der LV und in den Anschlussnetzen des RETRIG finden in den Jahren 1964–1969 statt (Tab. 1) [16,17,18].

Bemerkenswerte Mikrowellen-Tests führte die SGK/ETHZ 1968 in Zusammenarbeit mit dem IGM, Florenz, auf der schweizerisch-italienischen Seite Mottarone-Campo dei Fiori im angrenzenden Norditalien durch. Die 24 km lange Seite, welche ca. 1200 m über dem Seespiegel des Lago Maggiore verläuft und daher frei von gefürchteten Bodenreflexionen sein sollte, wird während einer ganzen Woche zu verschiedenen Tages- und Nachtzeiten mit Tellurometer MRA2, MRA3, MRA4, WILD Distomat DI 50 und AGA Geodimeter NASM4 und NASM6 fast pausenlos gemessen [16].

Die Auswertungen der Messungen bringen wertvolle Erkenntnisse zur Messunsicherheit der Mikrowellen-EDM. Die Rohmessungen werden mit den auf den Streckenendpunkten erfassten Meteodaten reduziert. Beim Vergleich der Messreihen zeigt sich ein markanter Tagesgang von ca. 45 cm, der auf die nicht erfasste Variation der Atmosphärenparameter entlang des Messstrahls zurück zu führen ist. Die Mikrowellendistanzen sind vor allem stark von der Luftfeuchtigkeit abhängig, während dieser Einfluss bei Lichtwellen gering ist (Tab. 2).

Parameter der Atmosphäre	Licht ~ ppm	Mikro ~ ppm
Temperatur Δt = 1° C	1.0	1.4
Druck Δp = 1mb	0.3	0.3
Feuchtigkeit (part. Wasserdampfdruck) Δp = 1mb	0.04	4.6

Tab. 2: Meteo-Einflusskoeffizienten der EDM [11].

Die Tellurometer-Resultate weisen zudem eine grosse mittlere Massstabsabweichung von -5.7 ppm gegenüber den Geodimeter-Distanzen auf. Auf Grund dieser Erfahrungen müssen die Verantwortlichen die hohen Erwartungen in die Mikrowellen-EDM für die LV in der Schweiz relativieren.

EDM mit Laser-Geodimeter Modell 8

Das AGA Laser-Geodimeter Modell 8 (Abb. 7) wird 1968, anlässlich des XI. Internationalen Photogrammetrie-Kongresses in Lausanne öffentlich vorgestellt. Der elektrooptische Lang-Distanzmesser arbeitet nach dem gleichen Phasen-Messprinzip wie die früheren Geodimeter-Modelle. Anstelle der bisherigen weissen Lichtquelle wird ein Helium-Neon (He-Ne)-Laser von 5 mW Leistung verwendet, der einen sehr eng gebündelten, kohärenten, roten Laserstrahl mit einer genau definierten Wellenlänge von 632.8 nm ausstrahlt. Das monochromatische Laserlicht ermöglicht die optische Ausfilterung aller störenden Tageslichteinflüsse, sodass auch tagsüber bei guten Sichtbedingungen Distanzen von bis zu 70 km gemessen werden können. Damit ist ein gewichtiger Nachteil der elektrooptischen Methode, die Beschränkung der Reichweite, auf einen Schlag weitgehend

Jahr	Institut	Instrumente	Netzteil des Landesnetzes LV03
1963-66	SGK/IGP/ DGFI	Tellurometer M/RA1 WILD Distomat DI 50	Lägern-Pfänder, BVN Heerbrugg, RETRIG-Anschluss Feldberg, Chasseral-Hörnli (Test)
1968	SGK/IGP IGM	WILD Distomat DI 50 Tellurometer MRA2, 3 ,4 AGA Geodimeter 4, 6	Mottarone – Campo dei Fiori (Test)
1968	L+T	AGA Geodimeter 6	RETRIG-Anschluss Signalkuppe-Dufourspitze
1968-69	SGK/IGP	WILD Distomat DI 50	BVN Aarberg, Westschweiz
1969	SGK/IGP	AGA Geodimeter 8	Gurten, Chasseral, Rigi, Säntis (Test)
1970	SGK/IGP	AGA Geodimeter 8	BVN Aarberg, Feldberg-Niesen
1971-72	L+T	AGA Geodimeter 8	Erneuerung LV03 1.-3. Ord. Kt. BL/BS
1973-74	SGK/IGP	AGA Geodimeter 8	1./2. Ord. Westschweiz / Ostschweiz
1975-76	SGK/IGP	AGA Geodimeter 8	BVN Bellinzona/Weinfelden, 1./2. Ord. Tessin
1976-77 1978-85	L+T	AGA Geodimeter 8, 6BL, WILD DI 20 u.A.	Erneuerung LV03 1./2. Ord. Westschweiz Erneuerung LV03 3. Ord. Kt. VD
1977	SGK/IGP	AGA Geodimeter 8	Alpentraverse I
1981-86	SGK/IGP	AGA Geodimeter 8 SIAL MD60, Flug-Meteo	«Testnetz Gotthard», Alpentraverse Gotthard
1985	AIUB/IGP Uni Delft	MOBLAS (terrestrische Messung mit SLR)	Generoso-Jungfraujoch Zimmerwald-Jungfraujoch

Tab. 1: Elektronische Distanzmessungen (EDM) in der LV [16,17,18].

Abb. 7: EDM mit AGA Geodimeter 8 des IGP 1975 mit W. Schneibel (Operateur) und W. Fischer, Projektleiter (l.) (Foto: S. Heggli).

Abb. 8: Reflektorstation mit Prismenarray (Foto: S. Heggli).

beseitigt. Die Standardabweichung einer Messung wird vom Hersteller mit 5 mm ± 1 mm/km angegeben, was bei den Geodäten grosse Erwartungen für den Einsatz in der LV weckt.

Erste Versuchsmessungen des IGP/SGK in Zusammenarbeit mit der L+T und der Herstellerfirma AGA mit einem Vorführgerät Geodimeter 8 finden im Oktober 1969 auf den Stationen Gurten, Chasseral, Rigi und Säntis statt. Mehrere Dreiecksseiten 1. / 2. Ord. von LV03 – u. a. die 60.4 km lange Seite Chasseral-Suchet – werden erfolgreich gemessen. Die Messergebnisse bestätigen die Herstellerangaben bezüglich innerer Messgenauigkeit und Reichweite, worauf ein solches Gerät, je zur Hälfte finanziert durch SGK und IGP, beschafft wird.

Im Unterschied zur Bedienung heutiger, vollautomatisierter Distanzmessgeräte, welche die Ergebnisse wenige Sekunden nach Knopfdruck digital anzeigen, ist bei der Messung mit dem Geodimeter 8 viel Erfahrung und Geschick des Beobachters erforderlich. Die Messequipe besteht üblicherweise aus Beobachter, Sekretär und einer Person für die Erfassung der Stationsmeteodaten und den Funkverkehr. Dazu kommen 3–4 Reflektor-Equipen à 1–2 Personen. Allein zum Aufstellen des über 23 kg schweren Geräts sind zwei kräftige Personen notwendig. Eine Autobatterie (12V) dient zur Stromversorgung. Die massstabsrelevante Modulationsfrequenz wird mit einem temperaturstabilisierten Quarzoszillator erzeugt. Dieser muss vor Messbeginn während 20–30 Min. auf Betriebstemperatur aufgeheizt werden. Das Auffinden und Anzielen der Reflektor-Stationen (Abb. 8), bestückt (je nach Distanz) mit 1, 3 oder einem Array von bis zu 24 oder mehr Prismen-Reflektoren, erfolgt bei guter Sicht mit dem Zielokular über die Empfangsoptik. Der Reflex des Laserstrahls ist auch über 60 km sichtbar. Bei schlechten Sichtverhältnissen (z. B. bei Dunst) ist die Zielsuche mit dem scharf gebündelten Laserstrahl (Öffnungswinkel ca. $60^{cc} \triangleq 6$ m auf 64 km) äusserst schwierig. Oft müssen Scheinwerfer-Blitze oder das Spiegeln des Sonnenlichtes mit grossen Aluspiegeln auf den Reflektor-Stationen helfen, das Ziel zu finden.

Nachdem die Signalstärke durch die Feinzielung optimiert ist, beginnt die Messung der Phasendifferenzen mit 3–4 unterschiedlichen Modulationsfrequenzen durch Suchen der Nullstellen der Amplitude. Vor jeder Messung erfolgt eine Kalibrierung auf dem geräteinternen Lichtweg. Die Ablesungen am Phasenschieber (Resolver) werden vom Sekretär in ein Rechenformular eingetragen. Die Berechnung der Distanz erfolgt simultan und erlaubt einen sofortigen Vergleich der Rohdistanzen. Eine Distanzmessung dauert im Schnitt 10–15 Minuten, wodurch Fluktuationen des Brechungsindexes der Luft über die Zeitspanne ausgemittelt werden. Der erfahrene Beobachter erhält im Verlauf der Messung viele Anhaltspunkte zur qualitativen Beurteilung der Messungen.

Während der Stationierung werden die Meteodaten (Lufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit und -druck) an den Streckenenden alle fünf Minuten ca. 2 m über dem Boden beobachtet und aufgezeichnet. Dabei kommen Aspirations-Psychrometer nach Assmann (Haenni) und Aneroidbarometer (Thommen) zum Einsatz.

Das Geodimeter 8 wird sehr rasch zum unverzichtbaren EDM-Gerät der LV. Bis Mitte der 1980er-Jahre kommt es sowohl in der LV wie auch bei vielen Anwendungen in der Ingenieurvermessung erfolgreich zum Einsatz. Da die EDM-Beobachtungen auch in die Ausgleichung des schweizerischen Anteils des RETRIG einbezogen werden sollen, erweitert die SGK das Messprogramm stark. Zu den Dreiecksseiten im Mittelland und Jura und den BVN wird auch die Alpentraverse mit Dreiecksketten über die Alpen ins Messprogramm aufgenommen (Tab. 1). Nachdem 1978 EDM-Ergebnisse für einen beträchtlichen Teil der Dreiecksseiten 1. Ord. vorliegen, analysiert Fischer [18] den Netzmassstab von LV03 und weist dabei Abweichungen von +5 ppm (NE-Schweiz) bis -16 ppm (Süd-Schweiz) nach. Auf Grund dieser Ergebnisse können die seit langem vermuteten Mängel im Bezugsrahmen LV03 lokalisiert und quantifiziert werden.

Zu Beginn der 1970er-Jahre kommt die EDM vermehrt auch in der AV (Triangulation 4. Ord.) zur Anwendung. Die Industrie hat inzwischen Infrarot (IR)-Distanzmesser (z. B. WILD DI 10, WILD DI 3, KERN DM500 etc.) für diese Anwendungen auf den Markt gebracht. Auslöser für diese neue Technik ist die Entwicklung der Galliumarsenid (GaAs)-Diode, welche eine direkte Modulation der IR-Trägerwelle erlaubt und damit eine kompakte Bauweise der Geräte ermöglicht.

Bei EDM-Arbeiten in der Nachführung werden in verschiedenen Teilen von LV03 lokale Netzzwänge festgestellt, die einige Dezimeter erreichen und die für eine moderne Vermessung nicht akzeptierbar sind. Deren Ursachen liegen primär im Netzaufbau. Die ungünstigen topographischen Verhältnisse und die Bewaldung in gewissen Gegenden des Mittellandes oder des Juras haben die direkte Verbindung zwischen benachbarten TPs verun-

Abb. 9: EDM der L+T auf TP 1. Ord. Suchet VD mit Geodimeter 8, 1976; Operateur: A. Carosio (Foto: A. Carosio).

Abb. 10: Aufbau des mobilen Messturms (Höhe bis 24 m) der L+T im Kanton VD (Foto: L+T).

möglicht. Die Schwächen wurden noch durch die Berechnungsmethode (Einzelpunkteinschaltung) verstärkt. Die Unzulänglichkeiten stammen teilweise aus dem übergeordneten Netz 1./2. Ord. und können nicht durch lokale Flickarbeiten beseitigt werden. Deshalb erneuert die L+T in den Kantonen Basel-Stadt, Basel-Landschaft und Waadt Teilnetze 1.–3. Ord. vollständig (Abb. 9). Dabei werden alte Original-Richtungsmessungen mit neuen EDM-Distanzen kombiniert und streng ausgeglichen [19, 20].

In den bewaldeten Gebieten des Waadtlandes müssen vielerorts mobile Beobachtungstürme (Abb. 10) aufgestellt werden, um die Sichtverbindung für die EDM überhaupt herstellen zu können. Neben dem Geodimeter 8 kommt ab 1980 in der Triangulation 3. Ord. oft der Infrarotdistanzmesser WILD DI 20 zum Einsatz, der wesentlich leichter zu bedienen ist und eine automatisierte Messung ermöglicht.

Weitere Entwicklung der EDM

Die Aufgaben und Ziele der Geodäsie erfahren in den 1970er-Jahren eine grundlegende Erweiterung. Mit den Erkenntnissen der modernen Plattentektonik gewinnen die Fragen der Geodynamik nicht nur in der Wissenschaft sondern auch in der LV zunehmende Bedeutung.

Aufgrund einer Initiative der Präsidenten der Schweizerischen Geodätischen und der Schweizerischen Geophysikalischen Kommission wird 1978 der «*Schweizerische Arbeitskreis Geodäsie/Geophysik*» gegründet. Dessen Ziel ist es, zuhanden der beiden Kommissionen gemeinsame Forschungsprojekte, insbesondere auf dem interdisziplinären Gebiet der Geodynamik, zu koordinieren [16].

Nachdem aufgrund der Auswertung wiederholter Messungen des Landesnivellements bereits signifikante Hebungsraten im Alpengebiet festgestellt wurden, stellt sich die Frage, ob wiederholte Messungen der Lagenetze nicht auch für kinematische Untersuchungen und zur Detektion von relativen Horizontalverschiebungen der Erdkruste in der Schweiz herangezogen werden könnten. In den 1980er-Jahren werden die EDM-Kampagnen im Netz 1./2.Ord. fortgeführt. Dabei sollen einerseits vorhandene Massstabsfehler aufgedeckt und anderseits Referenzdaten für zukünftige kinematische Untersuchungen bereitgestellt werden (Tab. 3).

In den Jahren 1981–83 und 1985–86 misst das IGP ein Teilnetz 1./2. Ord. im Gotthardgebiet und eine «*Alpentraverse*» sowohl mit Mikrowellen-EDM-Geräten SIAL MD60 wie auch mit dem Geodimeter 8. Zusätzlich werden Meteodaten mittels Ballonsondierungen und durch simultanes Befliegen des Messstrahls mit einem Motorsegler erfasst [21].

Das SIAL-Gerät ist ein Nachfolger des WILD Distomat DI 50, hergestellt von Siemens-Albis, Zürich (Abb. 11) und kommt zuerst als WILD DI 60 auf den Markt. Als 1969 aus Albiswerk Zürich die Siemens-Albis AG wird, entsteht die Typenbezeichnung SIAL MD60. Das Gerät zeichnet sich durch verminderte Einflüsse durch Bodenreflexionen (Ground Swing) aus und erlaubt eine automatisierte Messung in wenigen Sekunden.

Ein einmaliges Experiment zur Messung einer Alpentraverse mittels EDM findet 1985 statt. Das IGP führt in enger Zusammenarbeit mit der Technischen Universität Delft und dem AIUB auf dem Monte

Abb. 11: EDM mit SIAL MD60, Alpentraverse Gotthard (Foto: D. Steudler).

Generoso mit einer mobilen SLR-Station *MOBLAS* Messungen zu Satelliten (LAGEOS) durch. Gleichzeitig wird auf der permanenten Satellitenstation Zimmerwald ebenfalls beobachtet. Von beiden Stationen aus werden zusätzlich Laserpulse zu einem Reflektor auf einem Zwischenpunkt oberhalb des Jungfraujochs auf 3800 m ü. M. gesandt. So werden die Distanzen Generoso-Jungfraujoch und Zimmerwald-Jungfraujoch gemessen und damit eine terrestrische Nord-Süd-Alpentraverse hergestellt. Die Messungen sollen zusammen mit den SLR-Ergebnissen und gleichzeitigen GPS-Messungen mit zwei TI4100-Empfängern (Kap. 4.4) als Referenz für spätere kinematische Untersuchungen dienen [22].

Weitere Entwicklungen bei den EDM-Verfahren seien hier nur am Rande vermerkt, da sie in der LV bei der terrestrischen Messung des *Testnetzes Turtmann* 1985–86 [40] (s. Kap. 4.4) sowie bei der Referenzmessung von Eichstrecken zum Einsatz kamen. Mit dem Mekometer ME 3000 und dem Nachfolgemodell ME 5000 bringt die Firma KERN 1973 bzw. 1986 einen elektrooptischen Präzisionsdistanzmesser auf den Markt, der in der Ingenieurvermessung breite Anwendung findet.

Der Zweifarben-Laser-Distanzmesser Terrameter LDM2 (Abb. 12) der Firma Terra Technologies (USA) benützt zur Distanzmessung zwei Laser unterschiedlicher Wellenlänge im roten (He-Ne, 0.6328 nm) und im blauen (He-Cd, 0.4416 nm) Bereich des Spektrums [23]. Aus der Differenz zwischen den mit beiden Lichtwellen gemessenen Distanzen kann der Ein-

Abb. 12: Zweifarben EDM, Terrameter LDM2 im Testnetz Turtmann 1986 (Foto: swisstopo).

fluss der Atmosphäre bestimmt und eliminiert werden (Dispersionsverfahren). Die Messgenauigkeit beträgt etwa 100 ppb, d.h. 0.1 mm pro km [23]. Die Entwicklung kommt aber zu spät.

Ab 1988 geht die Epoche der EDM in der LV mit dem raschen Aufkommen der satellitengestützten GPS-Methode abrupt zu Ende. Weitgehend ausgearbeitete Projekte für Präzisionsdistanznetze zur Untersuchung von horizontalen Erdkrustenbewegungen in der Nordschweiz werden im Hinblick auf die neuen Möglichkeiten ad Acta gelegt. Mit der EDM findet auch die über 200-jährige Triangulationstechnik und damit eine hochentwickelte Messkunst der LV ihr Ende.

4.2 Einsatz der Informatik in der LV

Trigonometrie kommt nicht ohne aufwändige Berechnungen, Multiplikationen, Divisionen und viele Winkelfunktionen aus. Bis weit ins 20. Jahrhundert müssen dazu Logarithmen verwendet werden. Wenn schon Winkelfunktionen in Tabellen nachgeschlagen werden, können ebenso gut gleich deren Logarithmen nachgeschlagen werden. Die Längen der Dreiecksseiten erhält man aus den Berechnungen ebenfalls logarithmisch und kann sie für die nächsten Berechnungen gleich wieder verwenden. So findet man z.B. in Eschmanns Tabellen neben den Längen der Dreieckseiten auch gleich noch deren Logarithmen. In dieser Zeit werden trigonometrische Netze in den allermeisten Fällen mit stark vereinfachten Methoden, in vielen Einzelschritten, berechnet. Strenge Ausgleichungen nach der Methode der kleinsten Quadrate werden wegen des immensen Rechenaufwands höchstens für wissenschaftliche Zwecke durchgeführt, so etwa für den Schweizer Anteil zum Gradmessungsnetz der SGK [6]. Mit dem Aufkommen der ersten mechanischen Rechenmaschinen (Millionär, ab 1895) ändert sich an dieser Situation noch nicht viel, denn Multiplikationen und Divisionen sind immer noch langwierige Operationen.

Erst die Informatik bringt eine markante Beschleunigung. Die ersten Tischrechner (1968) und Taschenrechner (1972) von Hewlett Packard, die auf Tastendruck eine Winkelfunktion mit ausreichender Genauigkeit liefern, sind geradezu sensationell. Sie bringen primär Vereinfachungen, ändern aber nichts an der Berechnung in mehreren Einzelschritten.

Schon zehn Jahre früher bieten Grossrechner mit umfangreichen Computer-Programmen auch die Möglichkeit, ganze Netze in einem Guss nach der Methode der kleinsten Quadrate auszugleichen. Zudem können auch kombinierte Netze, z.B. aus Winkeln und Distanzen, in einem Guss berechnet werden. In der Schweiz kommt diese Methode in der LV seit dieser Zeit ausschliesslich zum Einsatz. Wurde früher aus Kapazitätsgründen vor allem bedingt ausgeglichen, lässt sich die vermittelnde Ausgleichung viel einfacher programmieren. In der Schweiz wird das von der L+T ab 1968 entwickelte Ausgleichungsprogramm LTOP zum defacto-Standard [26].

Die Informatik bietet auch die Möglichkeit, neue theoretische Erkenntnisse in der praktischen Arbeit zu nutzen. So fliessen etwa Kriterien für die Zuverlässigkeit [24], robuste Ausgleichung und Fehlersuche [25] dank der Unterstützung durch das IGP (Prof. Carosio) in die Praxis und ins Ausgleichungsprogramm LTOP ein [26].

Die Informatik ermöglicht es, Messungen aus früheren Epochen nochmals streng auszugleichen und festzustellen, welchen Einfluss die beschränkten Rechenmöglichkeiten auf die früher bestimmten Ergebnisse gehabt haben. Für den Bezugsrahmen LV03 führt dies swisstopo mit der Diagnoseausgleichung mit Erfolg durch (Kap. 4.3). Ähnlich, aber mit viel geringerem Aufwand, wird auch der Bezugsrahmen LV1890 analysiert (Kap. 3.3).

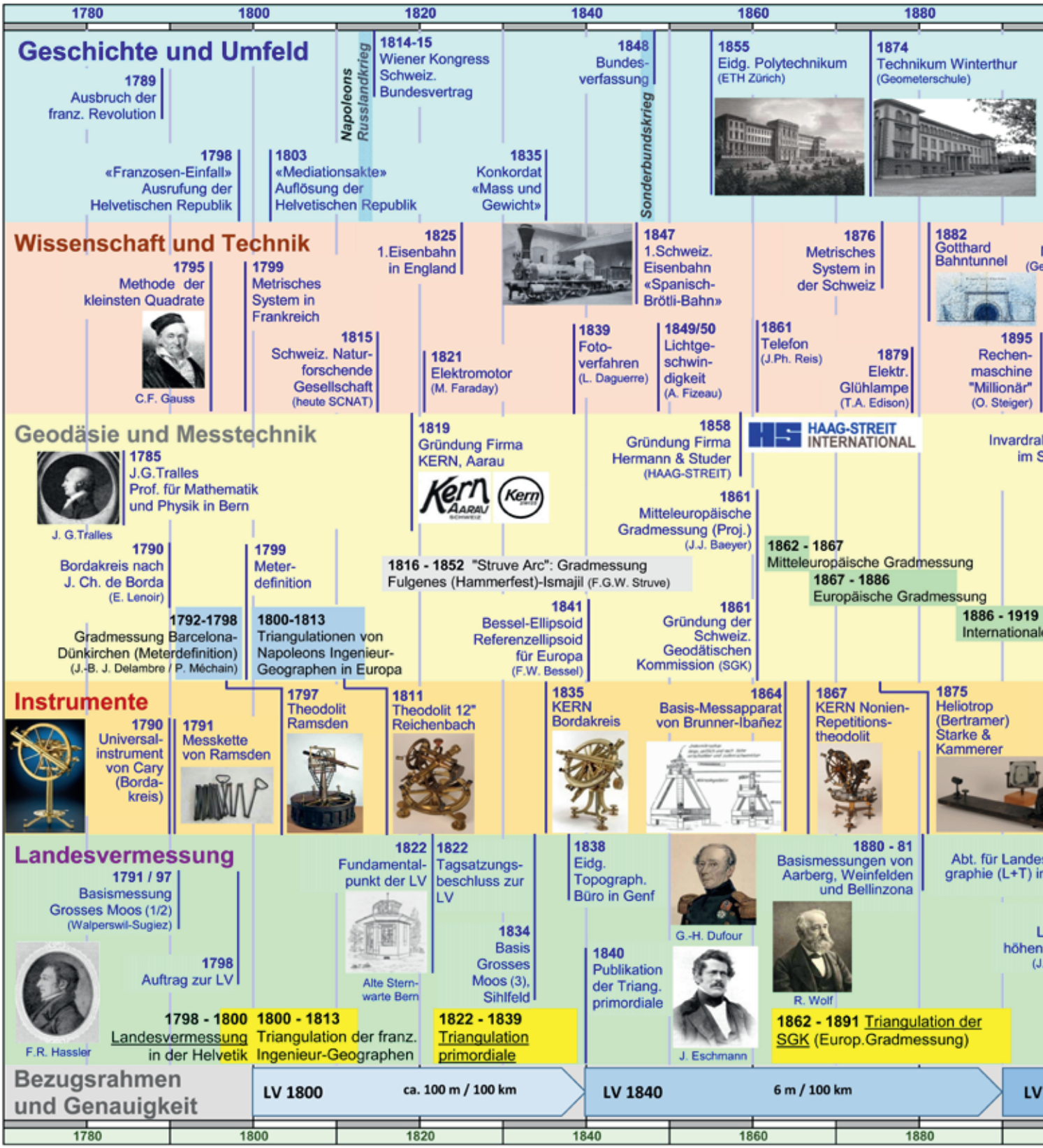
4.3 Diagnoseausgleichungen

Nachdem sich 1985 abzeichnet, dass mit der Einführung der neuen satellitengestützten Messverfahren (GPS) eine technologische Umwälzung in der LV erfolgen wird, beginnen die Arbeiten für den Aufbau eines neuen Bezugsrahmens LV95 [27, 28] (Kap. 4.5). Die Arbeitsgruppe LV95 von swisstopo beschliesst, Diagnoseausgleichungen der Netze 1./2. Ord. mit allen vorhandenen alten und neuen geodätischen Messungen der letzten Dezennien mit modernster Ausgleichungssoftware (LTOP) und den besten mathematischen Modellen durchzuführen [29].

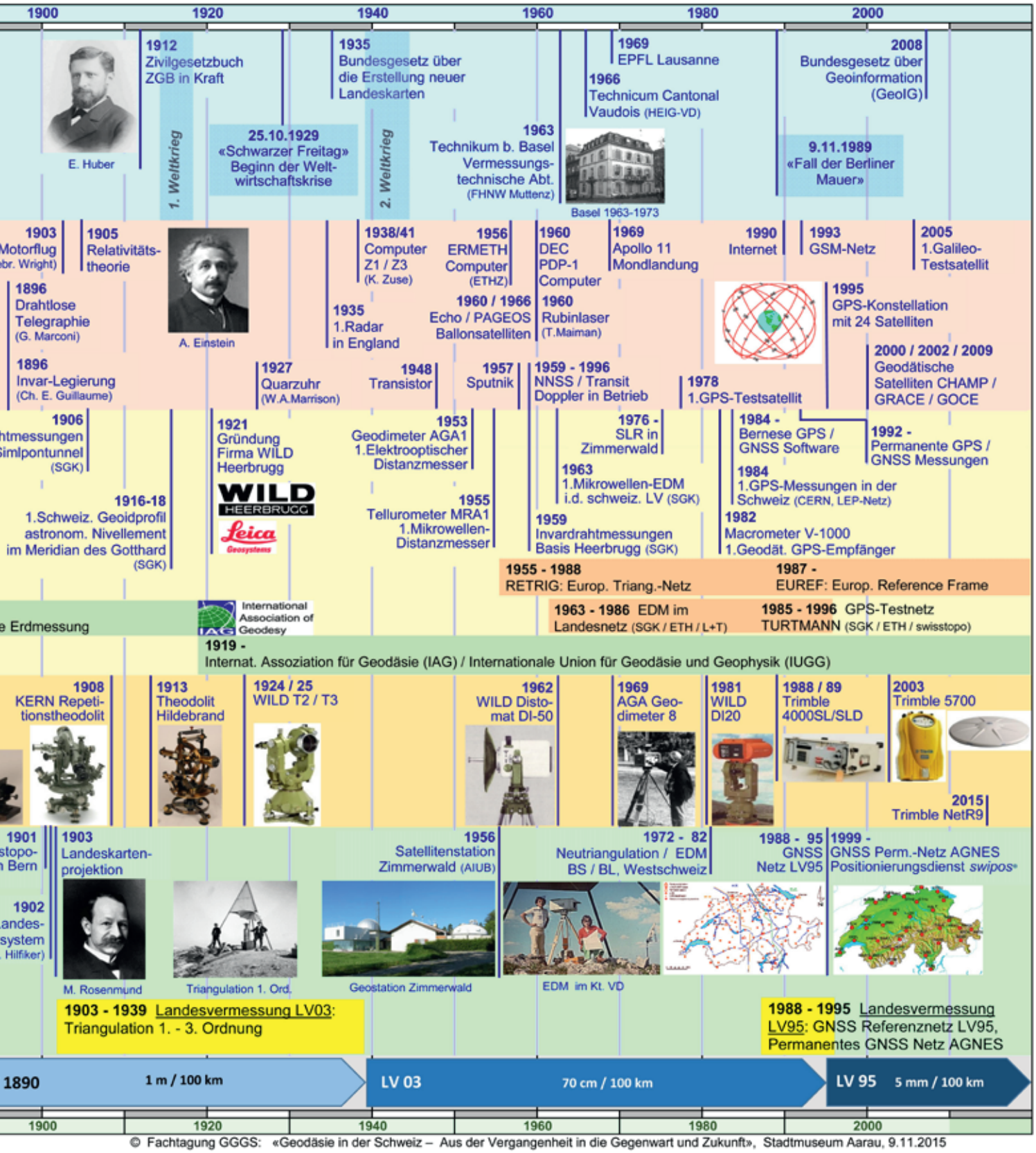
Das Projekt «*DIA93*» (Abb. 13) soll folgenden Zielen dienen:

- Vollständige Dokumentation aller geodätischen Messungen im Triangulationsnetz 1./2.Ord.
- Berechnung eines bestmöglichen Koordinatensatzes mit Varianz-Kovarianz
- Statistische Beurteilung der Genauigkeit der verschiedenen Beobachtungsklassen
- Ausgangsdatensatz für die Transformation LV03 → LV95
- Bereitstellen von Referenzdaten für die Untersuchung von Krustenbewegungen.

Abb. 13: Netzplan DIA93 (Ausschnitt) [19].



Zeitstrahl: Meilensteine der Landesvermessung



© Fachtagung GGGS: «Geodäsie in der Schweiz – Aus der Vergangenheit in die Gegenwart und Zukunft», Stadtmuseum Aarau, 9.11.2015

Beobachtungs-gruppe	Träger~ Licht (L) Mikro~ (M)	Epoche	Inst.	Anz.	m.F. a post. [mm/km]	Massstabs-korrektur [ppm]
Tellurometer M/RA1	M	1963	SGK	7	91.6	10.7 ± 1.4
WILD Distomat DI 50	M	1963-73	SGK	105	35.6	4.3 ± 0.3
AGA Geodimeter 8	L	1969-77	SGK	164	6.2	-0.5 ± 0.1
AGA Geodimeter 8	L	1970-85	L+T	120	6.5	-0.3 ± 0.2
AGA Geodimeter 8	L	1981-86	IGP	13	4.7	-1.4 ± 0.6
SIAL MD 60 +Meteo	M	1977-81	IGP	27	17.5	2.8 ± 0.6
SIAL MD 60 +Meteo	M	1983/86	IGP	45	16.4	0.5 ± 0.3
Azimute		1890-1970	SGK	53	2.0cc	
Richtungen		1893-1982	L+T	1991	2.3cc	

Tab. 3: Statistische Ergebnisse der Beobachtungsgruppen aus DIA95 (Auszug) [29, 30].

Die alten Original-Richtungssätze werden mittels Stationsausgleichungen neu erfasst, analysiert und bereinigt. Dazu werden eine Vielzahl wertvoller EDM-Messungen aus verschiedenen Kampagnen sowie die astronomischen Azimutbeobachtungen der SGK in einer Diagnoseausgleichung als freigelagertes Netz ausgeglichen. Das Ergebnis stellt den bestmöglichen Koordinatensatz (DIA93) aus einem Jahrhundert geodätischer Messkunst dar [29].

Die Diagnoseausgleichung dient in einem zweiten Schritt dazu, eine Brücke zum neu entstehenden GPS-Landesnetz LV95 zu schlagen. Nicht alle TP 1./2. Ord. sind für die Stationierung mit GPS geeignet. Trotzdem müssen diese in den neuen Bezugsrahmen LV95 integriert werden. Dies geschieht, nachdem die Koordinaten des neuen GPS-Landesnetzes LV95 mit 125 angeschlossenen TP 1./2. Ord. bestimmt sind und als Festpunkte in eine zweite Version der Diagnoseausgleichung «*DIA95*» im Bezugssystem CH1903+ eingeführt werden können [30]. DIA95 dient primär als Ausgangsdatensatz für die Koordinatentransformation zwischen altem und neuem Bezugsrahmen LV03 → LV95 (Software FINELTRA). Daneben ermöglichen die statistischen Ergebnisse von DIA95 eine objektive Beurteilung der Messunsicherheit der verschiedenen EDM-Beobachtungsgruppen (Tab. 3).

Die Resultate bestätigen sowohl die gute Qualität der alten Azimut- und Richtungsmessungen von LV03 wie auch die Kompatibilität mit den insgesamt fast 500 eingeführten Beobachtungen aus EDM-Messkampagnen unterschiedlicher Institute und Epochen. Die Überlegenheit der Laser-Distanzen (L) gegenüber den Mikrowellen-Distanzen (M) bezüglich Messgenauigkeit und Massstabsabweichung ist deutlich ersichtlich. Zudem sind die Verbesserungen, welche durch die zusätzliche Flug-Meteo-Erfassung bei der Mikrowellen-EDM erreicht wurden, erkennbar.

4.4 Einführung der Satellitengeodäsie Fotografische Richtungsbeobachtungen

Mit dem Start der unbemannten Raumfahrt Ende der 1950er-Jahre bekommt die Erdmessung durch die Entwicklung der Satellitengeodäsie neue Impulse. Dank der Möglichkeit, Messstationen über Distanzen von globaler Grössenordnung zu verbinden, können die Geodäten ein weltumspannendes Netz von Referenzpunkten mit geozentrischen 3D-Koordinaten errichten [31].

Dazu wird die Methode der fotografischen Richtungsbeobachtungen angewandt. Indem ein von der Sonne beleuchteter oder mit Blitzlampen ausgerüsteter Satellit zusammen mit dem Sternenhintergrund fotografiert wird, kann durch Ausmessen der Fotoplatte die Richtung zum Satelliten im Moment der Aufnahme in einem durch die Fixsterne definierten Bezugssystem bestimmt werden. In der Schweiz beteiligt sich das AIUB ab 1965 mit der Schmidt-Kamera des im Jahre 1956 gebauten Observatoriums Zimmerwald an den weltweit koordinierten optischen Beobachtungskampagnen aktiver und passiver geodätischer Satelliten. Über 650 Aufnahmen der passiven Satelliten Echo I + II, PAGEOS, Explorer 19 und 39 sowie der aktiven Satelliten Geos 1 + 2 werden ausgemessen und die Resultate der NASA zur Verfügung gestellt [32]. Als Resultat erscheint Zimmerwald erstmals als Station im weltweiten Netz der Satellitenbeobachtungsstationen. Die Genauigkeit des Verfahrens erlaubt es, die gegenseitige Lage von etwa 50 globalen Stationen auf ungefähr 5 m genau zu bestimmen. [31, 33].

Satellite Laser Ranging

Höhere Genauigkeiten ermöglicht das Verfahren des Satellite Laser Ranging (SLR), also Distanzmessungen zu Satelliten. Dabei wird ein kurzer, von einem Laser erzeugter Lichtpuls via Teleskop zu einem Satelliten gesendet, von wo er zum Laserteleskop zurück reflektiert wird. Gemessen wird die Laufzeit des Pulses (Zeitdifferenz zwischen Sende- und Empfangszeitpunkt). Multipliziert man die Laufzeit mit der Lichtgeschwindigkeit, erhält man die (doppelte) Distanz Bodenstation – Satellit (Kap. 4.1). Damit genügend Laserlicht am Satelliten reflektiert wird, muss dieser mit speziellen Retroreflektoren ausgerüstet sein.

Erste Versuche mit einem vom Institut für Angewandte Physik der Universität Bern (IAP) gebauten Laser werden vom AIUB in Zimmerwald bereits anfangs der 1970er-Jahre gemacht. 1975/76 werden spezielle Einrichtungen für SLR-Messungen gebaut [34]. Durch kontinuierliche Verbesserung aller Komponenten sowie der Auswertemethoden und nicht zuletzt auch dank der verbesserten Kenntnis des Gravitationsfeldes der Erde kann die Genauigkeit der Punktbestimmung bis Mitte der 1980er-Jahre von anfänglich etwa einem Meter auf wenige Zentimeter gesteigert werden [33].

Die Hauptanwendungen der SLR-Messungen liegen in der Geodynamik: Bestimmung der Rotationsparameter der Erde sowie der Kinematik der tektonischen Platten. Zudem werden die hoch-

präzis bestimmten Laserstationen als Referenzpunkte für die Bahnbestimmung diverser Erdbeobachtungs- und Navigationssatelliten verwendet. SLR ist an stationäre Einrichtungen von sog. geodätischen Fundamentalstationen gebunden und daher für die Bestimmung regionaler Referenzpunkte der LV nicht geeignet. Anwendungen, wie die im Kap. 4.1 beschriebenen Messungen der mobilen SLR-Station MOBLAS auf dem Generoso, bilden die Ausnahme.

Für die LV können aus den Forschungsarbeiten und (SLR-) Messungen auf der Geostation Zimmerwald vor allem Grundlagenkenntnisse gewonnen werden. Die Teilnahme an internationalen Messkampagnen und ab den 1990er-Jahren der Betrieb permanenter Messinstallationen im Rahmen globaler Referenzdienste (ILRS, IGS) ermöglichen die genaue und zuverlässige Bestimmung ihrer geozentrischen 3D-Koordinaten und Geschwindigkeiten in globalen, internationalen Referenzsystemen bzw. -rahmen. Dadurch hat sich Zimmerwald als Fundamentalstation der schweizerischen LV etabliert. swisstopo unterstützt deshalb ab 1992 den Ausbau und Betrieb der Station Zimmerwald, insbesondere durch die Installation eines permanenten GPS-Empfängers und dessen Integration in internationale Monitoring-Netze, die Übernahme bzw. Finanzierung des SLR-Betriebes und die Beteiligung am Ersatz des Laserteleskops durch ein wesentlich leistungsfähigeres System im Jahr 1995/96.

Doppler-Messungen an TRANSIT-Satelliten

Grössere Mobilität und das Potenzial für die effiziente Einmessung mehrerer Stationen von regionalen Referenznetzen der LV bringen die militärischen Navigationssatellitensysteme. Wegen der allgemeinen Zugänglichkeit der Satellitensignale können sie auch zivil für die Positionsbestimmung und Navigation genutzt werden.

Ab Ende der 1960er-Jahre kommen zivile Empfänger für das U.S. Navy Navigation Satellite System (NNSS), kurz TRANSIT-System, auf den Markt (Abb. 14). An den mit konstanter Frequenz ausgesendeten Mikrowellen (150 MHz und 400 MHz) der TRANSIT-Satelliten werden Dopplermessungen durchgeführt [35]. Aus den Dopplerfrequenzverschiebungen der empfangenen Satellitensignale mehrerer Satellitendurchgänge sowie den auf den Trägerwellen aufmodulierten Bahndaten können die geozentrischen Koordinaten der Empfangsantenne direkt im Empfänger berechnet werden.

Die mobilen geodätischen Dopplerempfänger sind recht handlich und werden mit Autobatterien betrieben. Sie laufen während der Beobachtungszeit von einigen Stunden bis einigen Tagen praktisch unbeaufsichtigt und liefern Punktkoordinaten im globalen Bezugssystem mit Submeter-Genauigkeit. Werden in einer Region mehrere geodätische Dopplergeräte gleichzeitig betrieben, so können die relativen Koordinatenunterschiede auf wenige Dezimeter bestimmt werden.

Ende der 1970er- und anfangs der 1980er-Jahre beteiligen sich das AIUB und das IGP an mehreren internationalen Dopplerkampagnen, wobei meist auch die Station Zimmerwald einbezogen wird.

In den Jahren 1984–86 kann das IGP mit Unterstützung ausländischer Institute 15 Dopplerempfänger organisieren (zwei davon eigene) und damit die ersten landesweiten satellitengestützten Mikrowellenmessungen durchführen. In der SWISSDOC Kampagne [36] werden 1984 in Zusammenarbeit mit swisstopo die Koordinaten und Höhen von 18 TP 1. Ord. bestimmt. Die Messungen werden in zwei Kampagnen à zehn Tagen aufgeteilt. Aus den 3D-Koordinaten der TP werden die Transformationsparameter der Landestriangulation (LV03 bzw. CH1903) sowie des RETRIG-Blockes CH (ED79) zu damaligen globalen Referenzsystemen berechnet. Diese sind bereits sehr ähnlich den späteren GRANIT-Parametern (s. unten). Die durchschnittliche Massstabsdifferenz zwischen LV03 und den Dopplerkoordinaten beträgt 5.7 ± 0.7 ppm (Distanzen in LV03 sind kleiner). Die Dopplermessungen bestätigen somit die mit EDM festgestellten Massstabsabweichungen in LV03.

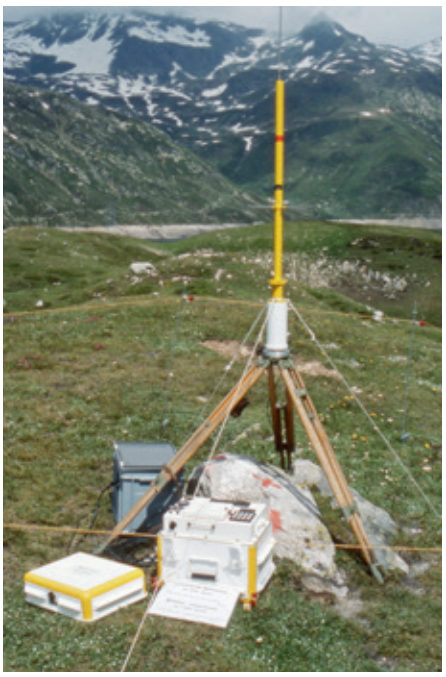


Abb. 14: TRANSIT-Dopplerempfänger Magnavox MX-1502 (Foto: GGL/ETHZ).

Als weiteres Doppler-Projekt sei ALGEDOP erwähnt, das Studien zur globalen Lagerung des Geoides der Schweiz bzw. des Geoides in den Alpen dient [37]. In vier Teilkampagnen 1984–86 werden in der Schweiz 19 an das Landesnivellement angeschlossene Punkte während sieben bis zehn Tagen beobachtet.

Erste GPS-Messungen in der Schweiz

Mit TRANSIT-Dopplermessungen müssen die Stationen für relative Positionsgenauigkeiten im Bereich einiger Dezimeter während mehrerer Tage stationiert werden. Das Mitte der 1980er-Jahre für geodätische Applikationen operationell werdende Satelliten-Navigationssystem NAVSTAR/GPS verspricht nach wesentlich kürzerer Messdauer eine Genauigkeitssteigerung um bis zu zwei Zehnerpotenzen und erweckt kühnste Erwartungen bei den Geodäten.

Die ersten GPS-Messungen in der Schweiz werden 1984 am CERN auf sieben Stationen im Grundlagenetz des Large Electron Positron Colliders (CERN-LEP) von 12 km × 12 km durchgeführt [38]. Diese Messungen mit dem ersten kommerziellen geodätischen GPS-Empfänger

Abb. 15: Erster geodätischer GPS-Empfänger Macrometer V-1000 im Testnetz TURTMANN (Foto: swisstopo).

Macrometer V-1000 (Abb. 15) [39] werden durch das AIUB und swisstopo begleitet und mit der «Bernese GPS Software» durch das AIUB ausgewertet. Der Vergleich mit den terrestrischen Messungen, welche mit dem hochpräzisen Zweifrequenzen-EDM-Gerät Terrameter (Kap. 4.1) durchgeführt werden, ergibt eine relative Genauigkeit von 0.5 ppm (5 x 10^{-7}).

Schon früh erkennt auch swisstopo die Bedeutung und die Chancen von GPS für die LV. Unter dem Dach der SGK konstituieren swisstopo, das AIUB und das IGP 1985 die «Arbeitsgruppe GPS» mit dem Ziel, die Forschung und die Anwendungen auf diesem Gebiet in der Schweiz zu koordinieren und gemeinsam weiterzutreiben. Von besonderem Interesse sind hochpräzise 3D-Anwendungen im alpinen Raum. Dazu wird im Kanton Wallis das «*3D-Testnetz Turtmann*» mit 5 km × 6 km × 1.5 km Ausdehnung installiert und mit höchstmöglicher Genauigkeit terrestrisch vermessen und dreidimensional ausgeglichen [40]. Von 1985 bis 1993 werden die neun Stationen des Netzes in 14 GPS-Messkampagnen mit 16 verschiedenen Empfängertypen gemessen (Tab. 4) [40]. Bis 1996 führt swisstopo und 2015 die FHNW noch weitere Messkampagnen durch.

Alle Tests von 1985 bis 1993 werden am AIUB unter der Leitung von Prof. G. Beutler mit der dort entwickelten «Bernese GPS Software» ausgewertet [40], die Kampagnen ab 1988 verarbeitet swisstopo mit derselben Software auch selber. Die ersten Messkampagnen dienen vor allem der Evaluation einer Empfängerflotte und der Ausbildung der Operateure für die LV. Aus den Erfahrungen im Testnetz Turtmann und den Vergleichen der Ergebnisse mit dem terrestrisch hochgenau bestimmten «ground truth» können zudem wertvolle Erkenntnisse für die Durchführung und Auswertung von GPS-Messungen gewonnen werden. Als Beispiele seien erwähnt: Die Kombination von Zweifrequenzendaten, die Optimierung der Troposphärenmodellierung (besonders bei Netzen mit grossen Höhendifferenzen), die Bildung von Ionosphärenmodellen (wichtig bei grossen Netzen), die Berücksichtigung von Antennenkalibrierungen und die realistische Beurteilung der GPS-Genauigkeiten aus der internen a posteriori Varianzschätzung. Die Vergleiche mit den terrestrischen Koordinaten und Höhen sowie die Analyse der Zeitreihen aus den wiederholten GPS Testkampagnen zeigen das Potenzial von GPS auch für Messungen im Alpenraum und für Deformationsmessungen aller Art auf.

Jahr / Mt.	Geräte
1985 / 10	Macrometer V-1000 Sercel TR5S Texas Instruments TI4100
1986 / 10	Trimble 4000S Wild-Magnavox WM-101
1987 / 10	Wild-Magnavox WM-101 Trimble 4000SX
1988 / 03	Trimble 4000SL
1988 / 05	Sercel NR52
1988 / 09	Trimble 4000SL/SLD
1989 / 07	Wild-Magnavox WM-102 Trimble 4000ST/SLD
1990 / 03	Rogue SNR-8 Trimble 4000SLD
1990 / 05	Ashtech LD-XII – L2
1991 / 10	Wild SR299
1992 / 10	Ashtech LM-XII3 Trimble 4000SSE Wild SR299
1993 / 09	Trimble 4000SSE
1994 / 09	Trimble 4000SSE / SST
1996 / 10	Trimble 4000SSE / SSi
2005 / 10	Trimble 5700 / 4000SSi
2015 / 7	Trimble 5700 / Leica GS14

Tab. 4: Im Testnetz Turtmann eingesetzte GPS-Empfänger [40].

Auf Initiative der erwähnten «Arbeitsgruppe GPS» und im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms NFP20 «Geologische Tiefenstruktur der Schweiz» findet im Juni 1987 die erste landesweite GPS-Kampagne «*GRANIT*» mit geodynamischer Zielsetzung [41] statt. Mit sieben Zweifrequenzen-Empfängern Texas Instruments TI4100 wird ein Netz mit zwölf grossräumig verteilten Stationen (150 km × 200 km) gemessen. Gleichzeitig werden auch Messungen mit fünf WILD WM-101 Einfrequenz-Empfängern gemacht mit dem Ziel, die Ionosphärenkorrektur der Zweifrequenzengeräte zu übernehmen. Die GPS Testkonfiguration erlaubt nur tägliche Mess-Sessionen von ca. vier Stunden wobei gleichzeitig bis zu sechs Satelliten sichtbar sind. Durch die beschränkten Empfangskanäle der TI-Empfänger können aber maximal vier Satelliten gleichzeitig beobachtet werden. Die GPS-Daten werden am AIUB mit der «Bernese GPS-Software» Version 3.1 ausgewertet. Die relative Genauigkeit (1σ) gegenüber Zimmerwald wird mit < 1 cm für die Lage und ca. 3 cm für die Höhe angegeben. Die Strecke Zimmerwald – Monte Generoso (159 391.78 m) ist gegenüber der GPS-Bestimmung von 1985 um mm ± 4 mm grösser. Aus der räumlichen 7-Parameter-Transformation (3 Translationen, 3 Rotationen, 1 Massstab) der globalen WGS84-Koordinaten (resp. Koordinaten im BIH Terrestrial System BTS87) auf die Landeskoordinaten im schweizerischen Bezugssystem CH1903 berechnet swisstopo einen «provisorischen Parametersatz» für die Umrechnung zwischen globalen und lokalen Koordinaten. Diese sog. «GRANIT-Parameter» finden rasch breite Verwendung. Der aus GRANIT bestimmte mittlere Massstab von LV03 beträgt -5.66 ppm (Distanzen in LV03 sind zu klein) [41].

1987 beschafft swisstopo vier Einfrequenz-GPS-Empfänger vom Typ Trimble 4000SL mit der Option, diese innert Jahresfrist auf Zweifrequenzen-Empfänger 4000SLD aufzurüsten. Ziel ist der Aufbau und die Messung eines landesweiten

hochgenauen Referenznetzes von GPS-Stationen (vgl. Kap. 4.5), um für den Technologiewandel in der Vermessung zeitgerecht die bestmöglichen Grundlagen zu liefern. Nebst dem Einsatz für die LV werden aber auch die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten für die effiziente Vermessung von Grundlagennetzen für verschiedenste Infrastrukturprojekte, z.B. Bahn2000 und NEAT, oder für kinematische Netze, z.B. Staumauerdeformationsnetze, erkannt. So erarbeitet swisstopo im selben Jahr im Auftrag der NAGRA ein Konzept für die Installation und Messung eines hochpräzisen GPS-Netzes zur Untersuchung von regionalen horizontalen Erdkrustenbewegungen in der Nordschweiz [42], als Alternative zu dem am Ende von Kap. 4.1 erwähnten Präzisionsdistanznetz. Die Messanlage besteht aus 25 Stationen (40 km × 80 km) und wird anhand einer vom AIUB durchgeführten Präanalyse mit simulierten Beobachtungen optimiert. Das gesamte Netz *«Neotektonik Nordschweiz»* wird im Oktober 1988 in zwei Kampagnen zu je vier Nächten mit drei Zweifrequenzen- und sieben Einfrequenzen-Empfängern (teilweise zugeliehen) gemessen. Die Sessionslänge beträgt 4.5 Stunden zwischen Mitternacht und Sonnenaufgang, während denen insgesamt sieben Satelliten (Abb. 16) beobachtet werden können. Die Sessionen werden so gelegt, dass die damalige GPS-Testkonstellation während den Nacht-Stunden zur Verfügung steht. Denn nachts ist die Ionosphärenaktivität und damit deren Einfluss auf die GPS-Messungen geringer.

Bei der Auswertung mit der «Bernese GPS-Software» Version 3.2 wird der Modellierung systematischer Einflüsse wie der Offsets der Antennen-Phasenzentren, der Satellitenbahnfehler sowie der troposphärischen und ionosphärischen Refraktion besondere Beachtung geschenkt. Die individuellen mittleren relativen Phasenzentren aller Antennen für die damalige Satellitenkonstellation werden anlässlich einer sog. Antennen-Kalibrierung auf der zu diesem Zweck eingerichteten Teststrecke Thun bestimmt. Aus der Wiederholbarkeit der Koordinatenbe-

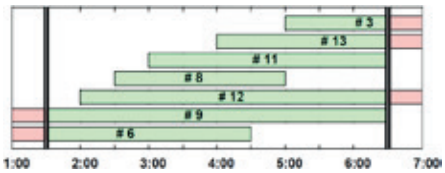


Abb. 16: «Neotektonik 88»: GPS-Satellitensichtbarkeit am 10.10.1988, Station Napf.

stimmungen in den zwei Kampagnen wird die innere Genauigkeit (1σ) der Lagekoordinaten zu 3 mm resp. der Punktlage zu 4 mm und der Höhen zu 6 mm geschätzt [42].

Die GPS-Kampagne für das Neotektonik-Netz wird mit den GPS-Messungen für die *Grundlagenvermessung* des Wisenbergtunnels sowie des Adlertunnels der damals geplanten Neubaustrecke Muttenz – Olten der *Bahn 2000* (Auftrag der SBB) kombiniert. Beide Netze erfordern bestmögliche Präzision der relativen Positionierung und können sich dank gemeinsamer Punkte gegenseitig verstärken.

Die Ergebnisse dieser GPS-Kampagnen vermögen sowohl bezüglich Qualität der Resultate als auch bezüglich hervorragender Effizienz und guter Planbarkeit zu überzeugen. Sie bestärken swisstopo in ihrer Zielsetzung, möglichst rasch ein landesweites GPS-Referenznetz höchster Präzision aufzubauen und zu messen. Die Kampagnen im Herbst 1988 sind lehrreiche Vorbereitungskampagnen für die anstehenden Messungen im neuen LV95-Netz und werden schliesslich auch in dieses integriert.

4.5 GPS-Referenznetz LV95

Entsprechend dem Konzept von LV95 (Kap. 3.5) muss das GPS-Landesnetz als Referenzpunktfeld für bestehende und zukünftige Vermessungen dienen. Dies bedingt eine homogene Verteilung der Punkte über das ganze Land, welche auf bequeme Weise erreicht werden können (Zugänglichkeit), gute Horizontfreiheit aufweisen (GPS-Tauglichkeit) sowie stabil und dauerhaft in geeigneten geologischen Formationen verankert sind (Eignung für tektonische Untersuchungen). LV95 hat den grossen Vorteil, dass ihre Punkte nicht mehr auf Bergspitzen liegen, sondern nahe den wirtschaftlichen Zentren und in den Tälern gewählt werden können, wo auch die höchsten Genauigkeiten gefordert werden. swisstopo beginnt 1988 mit dem Aufbau des *«GPS-Landesnetzes»,* einem von der bestehenden Landestriangulation weitgehend unabhängigen Netz mit 104 Hauptpunkten [27, 28]. Das LV95-Netz wird in vier Sektoren eingeteilt und in den Jahren 1989 bis 1992 gemessen. Tab. 5 zeigt einige Kennwerte der Hauptkampagnen von LV95 sowie einer Spezialkampagne, in der die fünf EUREF-Punkte der Schweiz im Rahmen einer internationalen Messkampagne bestimmt werden. Zusätzliche Messkampagnen werden für die Anschlüsse an die LV03 1./2. Ord. und an das Landesnivellement gemessen. Denn um die qualitativ hochstehende Transformation für den Übergang von LV03 zu LV95 gewährleisten zu können, muss der Bezug zur bestehenden LV und zur AV hergestellt werden. Diese Aufgabe wird in enger Zusammenarbeit mit den Kantonen erledigt [43]. Schliesslich bilden die in beiden Bezugsrahmen bestimmten Transformationsstützpunkte und die sog. Dreiecksvermaschung die Grundlage für die an der ETH speziell dafür entwickelte *FINELTRA-Transformation.* swisstopo seinerseits stellt die notwendigen Software-Werkzeuge (REFRAME) und Geodienste im Internet bereit [44].

Kampagne	Jahr	Anzahl Stationen	Anzahl Empfänger	Anzahl Satelliten	Anzahl Messtage	Sessions-Dauer [h]
LV95-89	1989	47	12	7	10	4
LV95-90	1990	75	13	8	9	7
LV95-91	1991	51	13	10	9	8
LV95-92	1992	31	11	12	9	8
EUREF-CH	1992	7	7	18	5	23

Tab. 5: Kennwerte der Hauptkampagnen 1989-1992 von LV95.

Von 1994 bis 2001 wird das LV95-Hauptnetz zudem mit 103 Verdichtungspunkten ergänzt. Diese werden gestützt auf die lokalen Bedürfnisse ausgewählt, weshalb die Punktverteilung im Gegensatz zu den Hauptpunkten nicht mehr homogen ist. Total umfasst das LV95-Netz somit über 200 Punkte und wird seit 1998 von swisstopo alle sechs Jahre neu gemessen. Die Bezugsrahmen LV95 bzw. CHTRF sollen die Referenz für alle Vermessungen in der Schweiz bilden. Die GeoIV gibt vor, dass ab 2016 alle Georeferenzdaten in LV95 geführt werden, insbesondere auch die AV. Bereits vorher dienen die Messungen für LV95 auch dem Aufbau der *NEAT-Grundlagennetze* zur Absteckung des Lötschberg- und des Gotthard-Basistunnels.

Die wiederholten Neumessungen (Abb. 17) des CHTRF-Bezugsrahmens (CHTRF95, -98, CHTRF2004, -2010) werden für tektonische Untersuchungen u.a. im Projekt Swiss4D verwendet. Die aus den Koordinatenänderungen berechneten linearen horizontalen Geschwindigkeiten der Punkte im GPS-Landesnetz sind jedoch kaum grösser als 0.6 mm/Jahr (3σ). Innerhalb der Schweiz sind die relativen horizontalen Bewegungen somit geringer als die aus dem Landesnivellement bestimmten vertikalen Hebungen und Senkungen gegenüber dem Referenzpunkt Aarburg. Dieses Resultat lässt die Schlussfolgerung zu, dass ein markanter Anteil der Alpenhebung isostatischen Ursprungs ist und der tektonische Anteil aus den horizontalen Verschiebungen geringer ist als noch in den 1980er-Jahren erwartet.

Im Gegensatz zu den CHTRF-Bezugsrahmen wird der Bezugsrahmen LV95 statisch belassen. Die offiziellen, ins Bezugssystem CH1903+ umgerechneten LV95-Koordinaten werden erst bei Veränderungen von mehr als 2 cm angepasst. Die Genauigkeit der statischen Koordinaten des LV95-Gesamtnetzes wird anhand der Wiederholbarkeiten in den verschiedenen Kampagnen mit empirischen Standardabweichungen von 2 mm für die Lagekoordinaten und 8 mm für die Höhe geschätzt [45]. Für weitere Informationen zum Aufbau, der Messung

Abb. 17: GPS-Messung CHTRF2010 auf dem LV95-Punkt Emmetten (Foto: swisstopo).

und Auswertung der neuen Landesvermessung LV95 sei auf die Reihe der Berichte aus der L+T bzw. die swisstopo-DOKU-Serie verwiesen. Die Punkte selber werden im Fixpunkt-Datenservice verwaltet und alle Informationen sind über den zugehörigen Datenviewer bzw. über das Geoportal des Bundes map.geo.admin.ch allgemein zugänglich.

4.6 GNSS-Permanentnetz AGNES und Positionierungsdienst swipos®

Abgesehen davon, dass das GPS-Landesnetz mit modernen Methoden der Satellitengeodäsie gemessen worden ist, stellt es nach wie vor ein konventionelles geodätisches Netz dar. Dem Benutzer wird ein Punktfeld mit gut zugänglichen, stabil und dauerhaft versicherten Referenzpunkten mit genauen, zuverlässigen 3D-Koordinaten zur Verfügung gestellt.

Mit dem Aufkommen moderner GPS-Auswertetechniken und Telekommunikationsmittel werden neue Wege der Bereitstellung von geodätischen Bezugsrahmen machbar. Permanent betriebene GNSS-Stationen können als «aktive Kontrollpunkte» dienen, deren Daten entweder in Echtzeit durch «Differential GPS (DGPS)»- bzw. «Real-Time Kinematic (RTK)»-Dienste oder nachträglich für klassische GPS-Auswertungen zur Verfügung gestellt werden. Durch den permanenten Betrieb der Referenzstationen wird zudem die Genauigkeit und Aktualität der Bezugsrahmen im Vergleich zu den epochenweisen, zeitlich begrenzten GPS-Kampagnen erheblich gesteigert.

Das Konzept eines GPS-Dienstes gestützt auf Permanentstationen wird durch die IAG seit 1992 weltweit mit dem International GPS Service for Geodynamics (IGS, neu «International GNSS Service» genannt) umgesetzt. Koordiniert durch die IAG-Subkommission EUREF wird in Europa das «European Permanent Net» (EPN) betrieben. Sowohl der globale ITRF-Bezugsrahmen als auch der europäische ETRF-Rahmen werden täglich ausgewertet und überwacht, indem für alle Stationen kontinuierliche Koordinatenzeitreihen bestimmt werden. swisstopo beteiligt sich an diesen Netzen seit 1992 mit einem permanenten GPS-Empfänger auf der Geostation Zimmerwald (Abb. 18).

Auf der Auswerteseite tragen das AIUB und swisstopo als Analysezentren zum IGS und EPN bei. Zusammen mit weiteren Partnerinstitutionen berechnen sie zudem im Rahmen des Center for Orbit Determination (CODE) täglich präzise GNSS-Satellitenbahnen, Stationskoordinaten, Erdrotationsparameter, Satelliten- und Empfängeruhrkorrekturen, Ionosphären- und Troposphärenparameter und machen diese allgemein verfügbar.

Ab 1996 werden die Daten der Station Zimmerwald für einen nationalen DGPS-Dienst verwendet. Dabei werden die berechneten Korrekturdaten über UKW/RDS zu DGPS-Benutzern übertragen, welche mit diesem Verfahren Genauigkeiten von wenigen Metern erreichen können. Der Dienst wird hauptsächlich für Navigationsanwendungen aller Art sowie für die Datenerfassung im GIS-Bereich verwendet. Doch um die Vision einer cm-genauen Positionierung in Echtzeit im ganzen Land zu ermöglichen, ist eine einzelne Station nicht genügend. Zwischen 1996

Abb. 18: Geostation Zimmerwald mit Mast der AGNES-Station in Bildmitte (Foto: swisstopo).

und 2001 baut swisstopo das *Automatische GNSS-Netz Schweiz (AGNES)* mit 31 Permanentstationen auf [46]. AGNES wird als multifunktionales Referenznetz konzipiert, welches für Anwendungen in der LV und als Basis für Echtzeit-Positionierungsdienste sowie für wissenschaftliche Studien (Atmosphärenforschung und Geodynamik) verwendet werden kann. Es ist eine Ergänzung bzw. Weiterentwicklung des LV95-Netzes und realisiert den Bezugsrahmen LV95 aktiv durch permanent betriebene GNSS-Stationen. Die Stabilität sowie die Funktionalität des AGNES-Netzes werden vom swisstopo-Auswertezentrum durch tägliche Netzwerklösungen mit der Bernese GNSS Software überwacht. Die mittlere Standardabweichung einer Wochenlösung beträgt 1–2 mm in der Lage und ca. 5 mm in der Höhe.

Die Messdaten der AGNES-Stationen werden in einer Zentrale gesammelt. Dort werden sie gemeinsam verarbeitet und «in Echtzeit», d.h. innert einer Sekunde über den *Swiss Positioning Service swipos®* den Kunden zur Verfügung gestellt. Sie können über Internet auch für sog. postprocessing Anwendungen bezogen werden (swipos-PP).

swisstopo bietet zwei Positionierungsdienste unterschiedlicher Genauigkeiten an:

- swipos-NAV: DGPS-Positionierungsdienst mit m-Genauigkeit
- swipos-GIS/GEO: RTK-Positionierungsdienst mit cm-Genauigkeit

swipos-GIS/GEO wird seit Anfang 2002 flächendeckend angeboten und ermöglicht eine cm genaue Positionierung in Echtzeit in der ganzen Schweiz. Der Dienst basiert auf dem Prinzip der virtuellen Referenzstation (VRS). Dabei werden den Benutzern für ihre Näherungspositionen interpolierte Korrekturdaten aus dem AGNES-Netz geschickt, anstatt einfach die Daten der nächstgelegenen Referenzstation wie bei klassischer DGPS- oder RTK-Vermessung. Das Netz der Referenzstationen wird zudem durch die Einbindung von Permanentstationen der Nachbarländer im grenznahen Raum erweitert.

Die Datenverbindungen werden den jeweils aktuellen Kommunikationsmöglichkeiten angepasst. Seit Anfang 2005 werden für swipos mobile Internetverbindungen (GPRS) eingesetzt [47]. Im Jahr 2007 werden die reinen GPS-Empfänger im AGNES-Netz durch GPS/GLONASS-fähige GNSS-Empfänger ersetzt. Dabei müssen auch die Antennen ersetzt werden. Um dem wichtigen Aspekt der Kontinuität Rechnung zu tragen, werden auf zehn AGNES-Stationen Doppelstationen eingerichtet und die bestehenden GPS-Empfänger parallel zu den neu installierten GPS/GLONASS-Empfängern weiter betrieben. Die Steigerung der Anzahl der Satelliten wirkt sich vor allem für die swipos-Positionierungsdienste positiv aus, da die Verfügbarkeit von swipos in schwieriger Messumgebung (bebautes Gebiet, enge Täler usw.) erhöht wird. Im Frühling 2015 werden auf den AGNES-Stationen neue GNSS-Empfänger installiert, welche alle aktuellen Navigationssatellitensysteme verarbeiten können, inkl. das europäische Galileo- und das chinesische Beidou-System. Ebenso wird swipos-GIS/GEO sog. «Multi-GNSS»-tauglich aufgerüstet.

Erwähnt sei, dass Ende der 1990er-Jahre auch die Firma Swissat AG ein privates GPS/GLONASS-Netz aufbaut und einen kommerziellen Positionierungsdienst betreibt. 2007 stellt die Firma den Betrieb aber aus wirtschaftlichen Gründen wieder ein. Da AGNES/swipos im gleichen Jahr auf GNSS erweitert ist, kann swisstopo einen vollwertigen Ersatz anbieten und ihre Kunden übernehmen. Ab 2009 schliessen sich einige Firmen, welche private GNSS-Permanentstationen betreiben, zusammen und bieten unter dem Namen refnet einen eigenen Positionierungsdienst an. AGNES und swipos® sind wichtige Komponenten der in Kap. 2 beschriebenen zeitgemässen LV bzw. des LVW95. Dank ihrer hohen Genauigkeit und Verfügbarkeit sowie ihres breiten Einsatzgebietes in Vermessung und Geomatik, Postitionierung und Navigation, Baugewerbe und Landwirtschaft, Wissenschaft und Forschung werden sie intensiv eingesetzt. Dies zeigt auch die erfreuliche Entwicklung des Kundenkreises, obwohl die Dienstleistungen kostenpflichtig sind, was eigentlich der Tradition der LV widerspricht.

5. Die nächsten Meilensteine

Von Mitte des 19. Jahrhunderts bis Ende des 20. Jahrhunderts kann die Genauigkeit des Bezugsrahmens der LV um den Faktor 1000 auf ca. 5 mm / 100 km gesteigert werden (siehe Zeitstrahl). Dies ist dank den im Beitrag dargestellten technologischen Entwicklungen möglich. Anderseits steigt mit dem Technologisierungsgrad der Gesellschaft auch der Bedarf an genauen und zuverlässigen Geodaten und damit an der Qualität der ihnen zugrunde liegenden Referenz.

Kinematisches Modell der Schweiz

Heute liegt die Genauigkeit der LV in der Grössenordnung der über wenige Jahre zu erwartenden tektonischen Bewegungen, womit sich auch die Aufgabenstellungen für die LV ändern. Nebst dem Unterhalt der Stationen und der periodischen Überprüfung ihrer Stabilität und ihrer Koordinaten durch Wiederholungsmessungen rückt zunehmend die Bestimmung der kontinuierlichen zeitlichen Änderungen der Koordinaten und damit der Bewegungen in den Vordergrund. Auch swisstopo nutzt die geodätischen Netze (GPS-Landesnetz, Landeshöhennetz LHN95 und insbesondere AGNES) zur Erfassung der tektonischen Bewegungen der obersten Erdkruste in Raum und Zeit durch die Berechnung von Zeitreihen. Ziel ist die Bestimmung des kinematischen Modells der Schweiz CHKM95 [48]. Im Rahmen des swisstopo Projektes Swiss4D können denn auch die 3D-Zeitreihen der LV95-Punkte sowie der AGNES-Stationen mit denjenigen des Landesnivellements kombiniert werden. Dank der immer länger werdenden Serie der GNSS-Messungen und deren Verknüpfung mit internationalen Referenzrahmen können die bisher nur lokal oder national bekannten Bewegungen in einen kontinentalen Bezug gestellt werden. Damit wird bei-

spielsweise erkennbar, dass sich nicht nur die Alpen gegenüber dem Mittelland heben, sondern auch die gesamte Schweiz gegenüber dem europäischen Tiefland. Die immer bessere Bestimmung der Kinematik der geodätischen Punktfelder und die Kombination der daraus bestimmten Strainfelder mit seismologischen Informationen (Herdflächen) sollen künftig helfen, die Erdbeben-Gefährdungspotenziale besser einschätzen zu können.

Referenz für alle Geodaten der Schweiz

Die geodätischen Grundlagendaten sind primär die Koordinaten, Höhen und Schwerewerte des Referenzrahmens und des Schwerefeldes der Erde sowie deren Änderungen. Die Referenznetze der LV bilden die landesweite «absolute» Referenz für alle Deformationsmessungen, sei es von Bauten und Strukturen, wie z.B. Staumauern oder Verkehrsinfrastruktur oder vom Gelände, z.B. Permafrostgebieten oder Rutschhängen (Structural and Natural Hazard Monitoring; Anwendungen von swipos-INFRA). Dabei können Oberflächenmessungen sowohl Aufschluss über die lokale Deformationskinematik als auch über regionale Geländebewegungen geben und zum Prozessverständnis sowie zur Modellierung der Vorgänge beitragen. Aus Kostengründen und um bei Bedarf einer hohen Auflösung des Monitorings eine hohe Punktdichte realisieren zu können, werden immer mehr auch günstige «low-cost-Sensoren» (z.B. Einfrequenz-GNSS-Empfänger) eingesetzt. Diese Anwendungen sind allerdings nicht mehr Aufgaben der LV, sondern gehören ins Gebiet der Ingenieurgeodäsie.

Mit Einbezug von Schweremessungen sind auch wertvolle Rückschlüsse auf unterirdische Strukturen und Abläufe möglich (z.B. Beitrag zu quartärgeologischen 3D-Basismodellen, Beobachtung des Grundwasserspiegels etc.). Diesbezüglich ist es von grossem Nutzen, dass seit 2006 auch die Landesgeologie in swisstopo integriert ist, was die Zusammenarbeit mit der Geodäsie vereinfacht und intensiviert.

GNSS-Meteorologie und Atmosphärenforschung

Die Infrastruktur, bzw. die instrumentelle Basis der GNSS-Messungen auf den Permanentstationen, erlaubt es auch weitere Daten zu extrahieren, wie etwa solche zum atmosphärischen Wasserdampf (GNSS Meteorologie und -Tomographie) oder zum ionosphärischen Elektronengehalt (Weltraumwetter). Bereits heute fliessen aus den GNSS-Permanentnetzen berechnete Atmosphärenparameter in die Prognosemodelle der Meteorologen ein. Die geodätischen Messungen der LV dienen zunehmend auch der Analyse von Zeitreihen in anderen Wissensgebieten wie der Atmosphären- und Klimaforschung. Zudem ist die Bestimmung der Ionosphärenaktivität oder lokaler, zeitlich und räumlich hochauflösender Ionosphärenmodelle für die Betreiber von Kommunikationsnetzen oder für die Luftfahrt von Interesse. swisstopo beteiligt sich zusammen mit der ETH und dem AIUB an entsprechenden internationalen Projekten.

GNSS-Seismologie

Mit den neusten GNSS-Empfängern auf den AGNES-Stationen sind auch Messungen mit hochfrequenter Aufzeichnungsrate (50 Hz) möglich. Dadurch können beispielsweise bei Erdbeben die Erdbebenwellen erfasst und die Bodenbewegungen bestimmt werden (GNSS Seismologie). Diese geometrischen Informationen sind eine interessante Ergänzung zu den aus seismischen Messungen des Schweizerischen Erdbebendienstes ermittelten physikalischen Grössen, insbesondere der daraus berechneten Energie.

Umwelt- und Geo-Monitoring

Mit boden- und satellitengestützten Messinstrumenten liefert die Geodäsie also wichtige Beiträge zur Erfassung der für die Gesellschaft kritischen Prozesse im System Erde, dem sog. Geo-Monitoring, und zwar mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung. Die Prozesse der «dynamischen Erde» spielen sich sowohl in extrem kurzen (Erdbeben, Vulkanausbrüche, Hangrutschungen), in mittleren (Erdrotationsschwankungen, Oberflächenbewegungen der Weltmeere) als auch in sehr langen Zeitskalen ab (Plattenbewegungen, postglaziale Landhebung, Meeresspiegeländerungen, Schmelzen der polaren und kontinentalen Eiskappen und Gletscher) [49]. Heute gehört es zu den Aufgaben der nationalen geodätischen Institutionen, in der Schweiz also von swisstopo, die für ein landesweites Geo-Monitoring zur Erfassung von Bewegungen der Geländeoberflächen sowie des Untergrundes notwendigen geometrischen und gravimetrischen Grundlagen bereitzustellen sowie die dafür geeignete nationale Infrastruktur zu erstellen und zu betreiben.

Für die Erdbeobachtung kommen viele Fernerkundungsmethoden und Satellitenmissionen zum Einsatz, an denen die Geodäsie teilweise nur am Rand beteiligt ist, z.B. mit Referenzstationen oder bei der Bahnbestimmung. Direkt beteiligt, ja federführend ist die Geodäsie bei den Schwerefeldmissionen (CHAMP, GRACE, GOCE und ihren Folgeprogrammen), die in der Schwerefeldbestimmung neue Horizonte eröffnet haben und über die Beiträge zur Geoidbestimmung auch der LV zugutekommen. Gestützt auf diese Satellitenmissionen trägt die Geodäsie wiederum mannigfaltig zu diversen Umweltbeobachtungs-Programmen und zur Beobachtung globaler Veränderungen bei (z.B. mit Bezug zu Ozeanografie, Glaziologie, Hydrologie, Land- und Forstwirtschaft).

Terrestrische und satellitengestützte Verdichtung mit flächenhaften Methoden

Ein weiterer Trend in der Datenbeschaffung ist die flächenhafte anstelle der punktuellen oder linienhaften Erfassung der Messgrössen. Besonders zu nennen sind dabei die Radar- oder Mikrowelleninterferometrie sowie das Laserscanning und die LIDAR-Technologie. Sie werden sowohl satellitenbasiert als auch mit terrestrischen Systemen angewendet. Zwar sind letztlich auch diese Methoden, mit maximaler Auflösung betrachtet, punktbezogen. Doch im Vergleich zu geodätischen Fixpunkten können deren «Punkt-

wolken» geometrisch beinahe als kontinuierlich aufgefasst werden. Die Vorteile dieser Methoden können hier nicht weiter dargelegt werden. Als Anwendung mit Blick auf die LV sei lediglich die flächenhafte Verdichtung der aus dem Landesnivellement berechneten Vertikalbewegungen durch satellitengestützte differenzielle Radarinterferometrie (Differential SAR Interferometry – D-INSAR) erwähnt. Dabei können Geländeverschiebungen, z.B. Hebungen oder Senkungen im Millimeterbereich, festgestellt werden, und zwar gegenüber den punktbezogenen geodätischen Methoden mit deutlich besserer räumlicher Auflösung.

Raumbezug für neue Geolokalisierungsmethoden

Wie im Kap. 4.6 dargelegt, bietet die Geodäsie bzw. LV mittels GNSS-Referenznetzen, Permanentstationen und Positionierungsdiensten bereits heute die Referenz für vielfältigste Vermessungsanwendungen, z.B. in der AV oder im Bauwesen. In der Positionierung und Navigation entstehen neben den Weiterentwicklungen bei den GNSS (neue Satellitensysteme wie Galileo oder Beidou, neue Verarbeitungsmethoden wie z.B. PPP-RTK) viele neue «Geolokalisierungsmethoden», welche ihre Quellen insbesondere in der Telekommunikationstechnologie haben: Mobilfunk- oder GSM-basierte Ortung, WLAN-/WiFi- oder RFID-unterstützte Lokalisierung, Ultraschallsysteme usw. Viele dieser Technologien werden vor allem bei der Positionsbestimmung in Gebäuden (Indoor-Navigation) oder anderen Orten, wo GNSS stark eingeschränkt ist, eingesetzt. Und schliesslich sind auch die Möglichkeiten der inzwischen als klassisch zu bezeichnenden, in der Luftfahrt stark verbreiteten Inertialmesstechnik noch nicht ausgeschöpft. Als Fachstelle für die LV und Positionierung muss swisstopo seine Kompetenzen im Bereich der Geolokalisierungsmethoden erweitern, um deren bestehendes und zukünftiges Potenzial richtig einschätzen und die notwendigen Infrastrukturmassnahmen seitens der Nationalen Geodaten-Infrastruktur NGDI rechtzeitig angehen zu können. Ziel soll sein, dass ein landesweit einheitlicher Raumbezug (Bezugssystem und -rahmen) bereitgestellt und von allen Systemen verwendet wird, der unabhängig vom Standort, der Zeit und der verwendeten Positionierungs- oder Lokalisierungsmethode eine rasche, zuverlässige und eindeutige Positionierung und Navigation im nationalen geodätischen Bezugsrahmen (LV95) oder allenfalls in einem eindeutig darauf bezogenen lokalen Bezugsrahmen garantiert (z.B. in Gebäuden oder im Untergrund). Die Kunden sollen sich nicht um Fragen der Bezugssysteme und -rahmen kümmern müssen, wenn sie vom Aussenbereich (mit internationalem oder nationalem Bezug) in den Innenbereich (mit lokalem, gebäudespezifischem Bezug) gehen oder umgekehrt. Dieser Übergang soll ohne Interaktion des Menschen, also automatisch sowie zeitlich und örtlich unterbruchsfrei erfolgen. Daher soll sich swisstopo, bzw. die LV, «massgeblich» (im wahrsten Sinne des Wortes) an der einheitlichen Referenzierung der verschiedenen Lokalisierungsmethoden, bzw. deren Raumbezug, beteiligen und zu deren Kompatibilität beitragen.

Zusammenarbeit im Rahmen der SGK

Soweit einige Aufgaben- und Anwendungsgebiete mit engem Bezug zur Geodäsie und zur LV, ohne Anspruch auf Vollständigkeit. Ein Teil der beschriebenen Fachanwendungen stammt übrigens aus einem Vorschlag zur Forschungszusammenarbeit zwischen dem IGP/GGL und swisstopo von Prof. A. Geiger sowie aus der Beschreibung zukünftiger Entwicklungen am GGL von Prof. M. Rothacher [49]. Sowohl swisstopo, als die für die LV verantwortliche Behörde der Schweiz, wie auch die im Fachgebiet der Geodäsie und Geomatik tätigen Ausbildungs- und Forschungsstätten (AIUB, EPFL, ETHZ, FHNW, HEIG-VD) befassen sich nämlich intensiv mit diesen und weiteren Themen und Methoden. Sie sind bestrebt, ihre Kompetenzen zu erweitern, im Bereich der Messtechnik, deren Auswertung, Modellierung und Interpretation. Dasselbe gilt natürlich auch für die auf diesem Gebiet aktiven Firmen. All diese Institutionen pflegen einen erfreulichen Informationsaustausch und eine gute Zusammenarbeit im Rahmen der SGK.

Für die absehbare Zukunft ist nicht mehr die Verbesserung der Genauigkeit des Bezugsrahmens das Ziel. Wichtiger ist es, diesen Bezugsrahmen für alle Kundenkreise einheitlich, rasch und zeitgemäss zur Verfügung zu stellen. Zudem sollen Veränderungen in Raum und Zeit kontinuierlich, genau und möglichst zeitnah überwacht werden. Denn dank den technologischen Fortschritten nehmen die Einsatzgebiete der Geodäsie zu und damit auch die Bedeutung der LV, insbesondere für die immer vielfältiger werdenden Aspekte des Geo-Monitorings und der Umweltbeobachtung.

Dank

Martin Rickenbacher verdanken die Autoren die freundliche Überlassung seiner sorgfältig erfassten Originalmessdaten von LV1840 und wertvolle wissenschaftshistorische Ratschläge. Ein besonderer Dank gilt den vielen ehemaligen Berufskollegen und Freunden für die Bereitstellung von Bildern aus privaten Fotoarchiven. Diese Publikation wurde in dankenswerter Weise von folgenden Institutionen mit Kostenbeiträgen unterstützt: GGGS, FHNW und swisstopo.

Abkürzungen

AIUB	Astronomisches Institut der Universität Bern
AGNES	Automatisches GNSS Netz der Schweiz
ALGEDOP	Alpine Geoid Doppler Project
AV	Amtliche Vermessung
BIH	Bureau International de l'Heure, früherer internationaler Zeitdienst
BVN	Basisvergrösserungsnetz
CH1903+	Lokales Bezugssystem der LV95
CHKM95	Swiss Kinematic Model 1995 (Geschwindigkeitsmodell zu LV95)
CHTRFyy	Swiss Terrestrial Reference Frame (Globaler Bezugsrah-

	men der LV95; yy=Jahr)
CHTRS95	Swiss Terrestrial Reference System 1995 (Globales Bezugssystem der LV95)
CODE	Center for Orbit Determination in Europe
DGFI	Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut, Abt. 1, München
DIA93/95	Diagnoseausgleichung 1993 / 1995 der Landestriangulation 1./2. Ordnung (LV03)
DGPS	Differential GPS
D-INSAR	Differential SAR Interferometry
EDM	Elektronische Distanzmessung
ED79	European Datum 1979 (Geodätisches Datum von RETRIG)
EGIG	Expédition Glaciologique Internationale au Groenland
ETRS89	European Terrestrial Reference System 1989 (Globales TRS von EUREF)
EUREF	IAG-Subcommission for Europe (European Reference Frame)
FPDS	Fixpunkt-Datenservice (swisstopo)
Galileo	Europäisches GNSS
GGGS	Gesellschaft für die Geschichte der Geodäsie in der Schweiz
GGL	Geodäsie und Geodynamik Labor der ETH Zürich
GLONASS	Russisches GNSS
GNSS	Global Navigation Satellite System (Sammelbegriff)
GPS	Global Positioning System
IAG	International Association of Geodesy
IGM	Istituto Geografico Militare, Firenze
IGP	Institut für Geodäsie und Photogrammetrie ETH, Zürich
IGS	International GNSS Service
INSAR	Interferometric Synthetic Aperture Radar (SAR Interferometry)
ITRF	International Terrestrial Reference Frame
IUGG	International Union of Geodesy and Geophysics
LHN95	Landeshöhennetz 1995
LIDAR	Light detection and ranging
LV	Landesvermessung
LVW95	Landesvermessungswerk 95
LV03/95…	Bezugsrahmen der Landesvermessungen 1903/1995 …
L+T	Eidgenössische Landestopographie, Wabern (heute swisstopo)
NGDI	Nationale Geodaten-Infrastruktur
PPP	Precise Point Positioning
RETRIG	Réseau Européen des Triangulations (urspr. RETrig)
RTK	Real-Time Kinematic
SGK	Schweizerische Geodätische Kommission
SLR	Satellite Laser Ranging
swipos®	Swiss Positioning Service
SWISSDOC	Swiss Doppler Observation Campaign
swisstopo	Bundesamt für Landestopografie swisstopo, Wabern
Swiss4D	Kinematisches Modell der Schweiz
TP	Triangulationspunkt
TRANSIT	U.S. Navy Navigation Satellite System (NNSS) (Vorgänger von GPS)
VPK	Vermessung, Photogrammetrie und Kulturtechnik (heute Geomatik Schweiz)

Literatur:

[1°] Wolf R.: Geschichte der Vermessungen in der Schweiz als historische Einleitung zu den Arbeiten der schweiz. geodätischen Commission. Verlag S. Höhr, Zürich, 1879. p. 214ff.

[2°] Zölly H.: Geschichte der Geodätischen Grundlagen für Karten und Vermessungen in der Schweiz. Eidg. Landestopographie, Bern, 1948.

[3] Rickenbacher M.: Napoleons Karten der Schweiz, Landesvermessung als Machtfaktor 1798–1915. Baden CH: hier+jetzt, Verlag für Kultur und Geschichte GmbH, 2011.

[4°] Lang W.: Die Grundlinien der schweizerischen Triangulationen. Schweizerische Zeitschrift für Vermessungswesen und Kulturtechnik. 1939, Bd. 37, Heft 7–11.

[5°] Eschmann J.: Ergebnisse der trigonometrischen Vermessungen in der Schweiz. Orell Füssli & Cie, Zürich, 1840.

[6°] Schweiz. Geodätische Kommission (Herausgeber): Internationale Erdmessung. Das Schweizerische Dreiecksnetz. Bd. 1–5. Comm. von S. Höhr, Zürich 1881–1890.

[7°] Gubler, E.: 150 Jahre Schweizerische Geodätische Kommission. Geomatik Schweiz 6/2011, p. 260–268.

[8°] Gubler E., D. Gutknecht, U. Marti, D. Schneider, Th. Signer, B. Vogel, A. Wiget: Die neue Landesvermessung der Schweiz LV95. VPK 2/1996, p. 47–65.

[9°] Wiget, A., E. Brockmann, M. Kistler, U. Marti, A. Schlatter, B. Vogel, U. Wild: Das Landesvermessungswerk 1995 (LVW95). Geomatik Schweiz 6/2011.

[10] Fizeau H.: Sur une expérience relative à la vitesse de propagation de la lumière. Cr. hebd. Acad. Sci. Paris, Vol. 29, 90 1849.

[11] Rüeger J.M.: Electronic Distance Measurement. Springer, Berlin, 1990.

[12°] Meier D., H. Aeschlimann: Elektronische Distanzmessung: Rückblick und Ausblick. VPK 8/1986, p. 341–345.

[13] Wadley von Hirschberg M.: Trevor Lloyd Wadley Genius of the Tellurometer. Fish Hoek Printing, Fish Hoek, South Africa, 2009.

[14°] Gfeller P.: Glaziologische Grönlandexpedition 1959 mit Schweizer Beteiligung. Geomatik Schweiz 3/2006.

[15°] SGK (Herausgeber): Arbeiten der Bodenseekonferenz, Basismessung Heerbrugg 1959, Teile I bis VI. Astronomisch-geodätische Arbeiten in der Schweiz, Band 30, SGK, Zürich, 1974–1987.

[16°] SGK (Herausgeber]: Procès verbaux der Sitzungen der SGK. 1963–1985.

[17°] Fischer W.: Distomat-Messungen im Schweizerischen Triangulationsnetz 1. Ordnung. VPK 1/1966, p.1–18.

[18°] Fischer W.: The Scale of the Swiss First Order Triangulation Net. Bericht Nr. 30, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich. Zürich, 1979.

[19°] Chablais H., E. Gubler, D. Schneider, A. Wiget: Die geodätische Landesvermessung in der Schweiz, heute und morgen. VPK 4/1988, p. 154–163.

[20°] Chablais H., D. Schneider: Erneuerung der Landestriangulation in der Westschweiz. Netz 1. und 2. Ordnung.

Technischer Bericht. Eidg. Landestopographie, Wabern, 1979.

[21°] Elmiger A., R. Köchle, A. Ryf, F. Chaperon (1995): Geodätische Alpentraverse Gotthard. Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz, Band 50, SGK, Zürich.

[22°] Bürki B., H.-G. Kahle, E. Vermaat, D. Van Loon: Laserstrahlen vom Monte Generoso zum LAGEOS-Satelliten: Aktueller Forschungsbeitrag der Geodäsie und Geophysik zur globalen Geodynamik und Erdbebenfoschung im Rahmen von NASA'a Crustal Dynamics Project. VPK 6/1986, p. 225–231.

[23°] Gervaise J.: Résultats de mesures géodésiques avec le Terramètre, appareil électronique de mesures de distances à deux longueurs d'ondes. VPK 6/1984.

[24] Baarda, W. A.: Testing Procedure for Use in Geodetic Networks. Netherlands Geodetic Commission, Publications on Geodesy, 2/5, 1968.

[25] Carosio A.: Verfahren der multivariaten Statistik zur Beurteilung der Resultate und der Zuverlässigkeit geodätischer Messsysteme. Zürich: Dissertation der ETH Zürich, 1983.

[26] Gubler E.: Swisstopo Manual LTOP. Wabern b. Bern: swisstopo, 2002.

[27°] Schneider D., E. Gubler und A. Wiget: Aufbau der neuen Landesvermessung LV95. Teil 1: Vorgeschichte, Konzept, Projektorganisation und Planung. Berichte aus der L+T Nr. 6, Wabern, 1995.

[28°] Gubler E., D. Gutknecht, U. Marti, D. Schneider, Th. Signer, B. Vogel, A. Wiget: Die neue Landesvermessung der Schweiz LV95. VPK 2/1996, p. 47–65.

[29°] Chablais H., Th. Signer, B. Vogel: Aufbau der neuen Landesvermessung der Schweiz «LV95», Teil 4, Diagnoseausgleichung der Triangulation 1. und 2. Ordnung: «DIA93». Berichte aus der L+T Nr. 9, Wabern, 1995.

[30°] Signer Th., B. Vogel: Aufbau der neuen Landesvermessung der Schweiz «LV95», Teil 8, Gesamtausgleichung des GPS-Landesnetzes mit dem Diagnosenetz der Triangulation 1. und 2. Ordnung «DIA95». Berichte aus der L+T Nr. 14, Wabern, 2000.

[31°] Schmid H. H.: Konzeptionelle und fehlertheoretische Betrachtungen zur Erstellung eines geodätischen Weltsystems mit Hilfe der Satellitengeodäsie. VPK 4 / 1972, p. 99–124.

[32°] Schürer M.: Die geodätischen Arbeiten in der Schweiz während der letzten 25 Jahre. VPK 8/1986, p. 308–310.

[33°] Gurtner W., G. Beutler: Die Rolle der Satellitengeodäsie in der Vermessung. VPK 8/1986, p. 336–341.

[34°] Wild U., W. Gurtner: Aufbau der Landesvermessung der Schweiz «LV95», Teil 2, Geostation Zimmerwald: Satellite Laser Ranging (SLR) und GPS-Permanentbetrieb. Berichte aus der L+T Nr. 7, Wabern, 1995.

[35°] Geiger A. H.-G. Kahle: Zum Dopplerverfahren in der Satellitengeodäsie: ein Überblick. VPK 6/1982, p. 181–191.

[36°] Wiget A., A. Geiger, H.-G. Kahle: Die Doppler-Messkampagne SWISSDOC: Ein Beitrag zur Landesvermessung in der Schweiz. VPK 2/1985, p. 49–52.

[37°] Wiget A., H.-G. Kahle, A. Geiger: ALGEDOP: Ein Beitrag zur satellitengestützten Geoidbestimmung in der Schweiz. VPK 5/1986, p. 177–181.

[38°] Gurtner W.: GPS-Testmessungen auf dem CERN-LEP-Kontrollnetz. VPK 6/1986, p. 219–224.

[39] Counselman III C. C., D. H. Steinbrecher: The Macrometer: A Compact Radio Interferometry Terminal for Geodesy with GPS. 3rd Internat. Symposium on Satellite Doppler Positioning, Las Cruses, New Mexico, 1982.

[40°] Jeanrichard F. (Herausgeber) et al.: Dreidimensionales Testnetz Turtmann 1985–1993. Teil I; Teil II (GPS-Netz). Geodätischgeophysikalische Arbeiten in der Schweiz. Bände 45; 51. 1992; 1995.

[41°] Kahle H.-G. (Herausgeber) et al.: NFP20-Beitrag der Geodäsie zur geologischen Tiefenstruktur und Alpendynamik. Geodätisch-Geophysikalische Arbeiten in der Schweiz, Band 47, 1993.

[42°] Wiget A., E. Gubler, D. Schneider: GPS-Präzisionsnetz zur Bestimmung von rezenten Krustenbewegungen in der Nordschweiz. VPK 8/1991.

[43°] Vogel B., M. Burkard, M. Kistler, U. Marti, J. Ray, M. Scherrer, A. Schlatter, A. Wiget: Aufbau der neuen Landesvermessung der Schweiz «LV95», Teil 13, Einführung des Bezugsrahmens «LV95» in die Nationale Geodateninfrastruktur. swisstopo Doku Nr. 21, Wabern, 2009.

[44°] Kistler M., J. Ray: Neue Koordinaten für die Schweiz: Fertigstellung der nationalen Dreiecksvermaschung, neue Transformations-Software REFRAME und Eröffnung des Internet-Portals «Bezugsrahmenwechsel». Geomatik Schweiz 9/2007, p. 432–437.

[45°] Brockmann E., D. Ineichen, A. Wiget: Neumessung und Auswertung des GPS-Landesnetzes der Schweiz LV95. VPK 8/2005, p. 440–444.

[46°] Wild U., S. Grünig, R. Hug: Aufbau der neuen Landesvermessung der Schweiz «LV95», Teil 11, Automatisches GPS-Netz Schweiz (AGNES): Stationsnetz und Positionierungsdienste. swisstopo Doku Nr. 19, Wabern, 2006.

[47°] Grünig S., U. Wild: swipos über Internet. Neue Entwicklungen bei der Echtzeit-Positionierung. Geomatik Schweiz 3/2005.

[48°] Villiger A.: Improvement oft the Kinematic Model of Switzerland (Swiss4D-II). Geodätisch-Geophysikalische Arbeiten in der Schweiz, Band 90, 2014.

[49°] Kahle H.-G., M. Rothacher: Die höhere Geodäsie am IGP ETHZ – Zukünftige Entwicklungen am GGL. Geomatik Schweiz 6/2011, p. 290–292.

°) PDF verfügbar unter:
www.history-of-geodesy.ch/default.aspx? navid=182

Dieter Schneider
Schafmattstrasse 23
CH-3123 Belp
dieter.schneider@belponline.ch

Erich Gubler
Flugplatzstrasse 19B
CH-3122 Kehrsatz

Adrian Wiget
Bundesamt für Landestopografie
swisstopo
3084 Wabern