

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

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

Band: 94 (1996)

Heft: 2

Artikel: Die neue Landesvermessung der Schweiz LV95

Autor: Gubler, E. / Gutknecht, D. / Marti, U.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-235227>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 06.07.2025

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

Die neue Landesvermessung der Schweiz LV95

E. Gubler, D. Gutknecht, U. Marti, D. Schneider, Th. Signer, B. Vogel, A. Wiget

Die Schweizerische Landesvermessung stammt grösstenteils aus den ersten Jahrzehnten unseres Jahrhunderts, stützt sich aber teilweise noch auf ältere Messungen und Berechnungen aus der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts. Mit der Einführung der elektronischen Distanzmessung und der elektronischen Datenverarbeitung sind Zwänge in der Triangulation 1. bis 3. Ordnung aufgedeckt worden, insbesondere in bewaldeten oder topographisch schwierigen Gebieten, die im Extremfall mehrere Dezimeter auf wenige Kilometer erreichen. Die heutige Landesvermessung genügt deshalb den gewachsenen Ansprüchen nur noch bedingt. Mit dem Global Positioning System GPS wurde seit den 80er Jahren eine neue hochgenaue und gleichzeitig kostengünstige Methode entwickelt, die es erlaubt, in wenigen Jahren eine neue Landesvermessung aufzubauen. Seit 1988 hat das Bundesamt für Landestopographie ein neues Grundlagentnetz aufgebaut, das in der näheren Zukunft fast allen praktischen Bedürfnissen genügen dürfte. Es besteht aus ca. 100 sorgfältig ausgewählten geodätischen Punkten und soll in den nächsten Jahren nach Bedarf verdichtet werden. Die «absolute» Genauigkeit (1 σ) der Koordinaten liegt landesweit bei 0.5 bis 1 cm für die Lage und bei 2 bis 3 cm für die ellipsoidische Höhe. Besondere Beachtung wurde der Definition von zwei neuen Bezugssystemen geschenkt, von denen das eine optimal mit dem internationalen und dem europäischen Bezugssystem verbunden ist, ein kinematisches Modell enthält und sich für wissenschaftliche und die meisten hochgenauen Ingenieurprojekte eignet. Das andere ist statisch und stellt dem Anwender in der amtlichen Vermessung einen optimalen Bezugsrahmen zur Verfügung. Besondere Anstrengungen wurden unternommen, um den Übergang mittels Transformationen vom bestehenden, heute offiziellen System ins neue zu erleichtern. Analog zum rein geometrischen GPS-Netz wurden auch neue Höhensysteme festgelegt, deren Realisierung aber leider noch einige Jahre in Anspruch nehmen wird.

Les origines de la mensuration nationale remontent en grande partie aux premières décennies de ce siècle, et s'appuient partiellement sur d'anciennes mesures et des calculs datant de la seconde moitié du 19e siècle. L'introduction de la mesure électronique des distances et du traitement électronique des données a mis en évidence des distorsions dans la triangulation du 1er au 3e ordre, particulièrement dans les régions forestières et topographiquement difficiles. Ces distorsions atteignent plusieurs dm sur quelques km. La mensuration nationale actuelle ne répond plus de manière satisfaisante aux exigences toujours plus élevées des diverses mensurations. A partir des années 80 s'est développé la méthode GPS, permettant l'élaboration avantageuse d'un nouveau réseau national de haute précision. L'Office fédéral de topographie a mis sur pied dès 1988 un nouveau réseau de base qui devrait répondre à pratiquement toutes les exigences futures. Ce réseau, constitué d'environ 100 points géodésiques soigneusement choisis, sera densifié ces prochaines années, selon les besoins. La précision «absolute» (1 σ) des coordonnées est de 0.5 à 1 cm en situation et de 2 à 3 cm pour l'altitude ellipsoïdique. Un soin particulier a été porté sur le choix de deux nouveaux systèmes de référence. Le premier est rattaché de manière optimale aux systèmes de référence européen et international, contient un modèle cinématique, et est adapté aux études scientifiques et aux projets d'ingénieur de haute précision. L'autre est statique et confère à l'utilisateur une référence optimale. De grands efforts ont été réalisés pour faciliter le passage du système officiel actuel au nouveau système à l'aide de transformations. De plus, de nouveaux systèmes altimétriques ont été définis d'une manière analogue au réseau GPS purement géométrique. La réalisation de ces systèmes prendra encore quelques années de travail.

La maggior parte della misurazione nazionale svizzera ha origine nei primi decenni del nostro secolo ma si basa in parte su misure e calcoli eseguiti nella seconda metà del secolo scorso. Lo sviluppo delle misure elettroniche di distanza e dell'informatica ha permesso di scoprire distorsioni anche di qualche decimetro per chilometro nella triangolazione dal primo al terzo ordine, in particolare nelle zone boschive o topograficamente difficili. La misurazione nazionale odierna non soddisfa più le esigenze crescenti delle diverse applicazioni. Dagli anni Ottanta

1. Einleitung

Das Bundesamt für Landestopographie (L+T) ist in der Schweiz für die Erstellung der geodätischen Grundlagen (Bezugssysteme) und für den Aufbau, die Erhaltung und Nachführung der geodätischen Netze der Landesvermessung (LV) zuständig. Damit die sich wandelnden Anforderungen an die Grundlagentnetze (Bezugsrahmen) auch zukünftig erfüllt werden können, muss dabei mit der technologischen Entwicklung der geodätischen Messtechnik Schritt gehalten werden.

Das heute verwendete Referenzsystem der Schweiz (früher Geodätisches Datum genannt) stammt von 1902/03 und wurde mit den Triangulationsnetzen 1.–3. Ordnung und dem Netz des Landesnivellements als offizieller Bezugsrahmen realisiert. Dabei gehen Teile der Netze auf Arbeiten der Schweizerischen Geodätischen Kommission (SGK) aus der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts zurück. Die Schwächen dieser alten Grundlagen waren schon zu Beginn des Jahrhunderts bekannt und es wäre auch möglich gewesen, sie – wenigstens zum grossen Teil – zu beseitigen. Aus den Protokollen aus der Zeit vor 1910 geht hervor, dass darüber heftig diskutiert wurde. Weil aber damals in verschiedenen Gegenden die Katastervermessung schon voll im Gange war und man dringend auf die geodätischen Grundlagen angewiesen war, entschieden die Verantwortlichen, den Hauptast der Gradmessungstriangulation der SGK unverändert zu übernehmen. Ebenso wurden die neuen Nivellements «provisorisch» in die Knoten des «Nivellement de précision» der SGK eingezwängt und so Gebrauchshöhen berechnet, die später durch streng ausgeglichene Höhen ersetzt werden sollten. Aber wie es so geht mit Provisorien, diese «provisorischen Gebrauchshöhen» waren beim Abschluss des Landesnivellements schon in so vielen Vermessungen verwendet worden, dass an deren Ersatz nicht mehr zu denken war. Deshalb blieben die Kompromisse und Provisorien bis heute bestehen.

Seit den 60er Jahren wurden dank elektronischer Mess- und Berechnungsverfahren immer mehr Zwänge im Triangulationsnetz festgestellt, die an einigen Stellen mehrere Dezimeter zwischen benachbarten Punkten 3. Ordnung, also auf Entfernungen von wenigen Kilometern, erreichen und zu teilweise umfangreichen Erneuerungsarbeiten zwangen. Erst die dramatische Genauigkeits- und Effizienzsteigerung bei den satellitengestützten Vermessungsmethoden, insbesondere von GPS, erlauben es jetzt, diese Zwänge mit vernünftigem Aufwand vollständig zu beseitigen, was auf längere Sicht sicher auch wirtschaftliche Vorteile haben wird. Die L+T erkannte das Potential der GPS-Methode schon Mitte der 80er Jahre und

disponiamo di nuove tecniche economiche e precise, basate sul «Global Positioning System» (GPS), che hanno permesso di creare in pochi anni un nuovo sistema di inquadramento nazionale. Dal 1988 l'Ufficio federale di topografia ha realizzato una nuova rete di riferimento che dovrebbe soddisfare quasi tutte le esigenze del prossimo futuro. La rete è costituita da circa 100 punti base scelti accuratamente che saranno densificati nei prossimi anni in funzione delle esigenze. La precisione «assoluta» (1 σ) delle coordinate è compresa tra 0.5 e 1 cm in planimetria e tra 2 e 3 cm per la quota ellissoidica. Una cura particolare è stata dedicata alla scelta dei due sistemi di riferimento. Il primo è collegato in modo ottimale ai sistemi internazionale ed europeo, comprende un modello cinematico e si adatta alle esigenze scientifiche e tecniche di altissima precisione. Il secondo è statico e mette a disposizione della misurazione ufficiale un eccellente sistema d'inquadramento. Notevoli sforzi sono stati dedicati allo sviluppo di metodi di trasformazione per facilitare il passaggio dalle coordinate ufficiali attuali a quelle nuove. La rete GPS puramente geometrica sarà completata da nuovi sistemi di riferimento altimetrici che sono stati opportunamente definiti. La loro realizzazione richiederà purtroppo ancora qualche anno di lavoro.

bereitete sich systematisch auf eine völlige Erneuerung des Bezugsrahmens vor. Dabei war eines der Ziele, diesmal mit den Arbeiten so früh zu beginnen, dass ein neuer Bezugsrahmen so frühzeitig bereit sein konnte, dass er den Benützern zur Verfügung stand, bevor sie sich mit Provisorien helfen mussten. In einer ersten Phase wurden zusammen mit den Partnern in der SGK Testnetze und Testkampagnen organisiert und durchgeführt. Parallel dazu wurden alle Messungen im Triangulationsnetz 1. und 2. Ordnung aus den Originaldokumenten neu erfasst und in einer strengen Ausgleichung, der sogenannten Diagnoseausgleichung, analysiert. Anschliessend wurde das Projekt Landesvermessung 1995 (LV95) gestartet mit dem Ziel, die ganze Schweiz mit einem neuen Geodätischen Grundlagentnetz zu versehen.

Heute stehen die Arbeiten für dieses neue Netz kurz vor dem Abschluss. Allerdings sind wir damit noch nicht am Ende unserer Bemühungen, im Gegenteil. Es geht in der nächsten Zukunft darum, die Voraussetzungen zu schaffen, damit LV95 in allen Anwendungsbereichen den erhofften Nutzen bringen kann. Im Zentrum steht die Frage, wie das neue Bezugssystem und dessen Realisierung durch einen zentimetergenauen Bezugsrahmen, also ein Verzeichnis von Koordinaten wohl definierter Punkte, aussehen sollten. Gleichzeitig muss aber auch in enger Zusammenarbeit mit der Eidg. Vermessungsdirektion (V+D) und mit Vertretern der Hochschulen und der Praxis festgelegt werden, ob und wie diese neuen Grundlagen für die praktischen Arbeiten, vor allem der amtlichen Vermessung, eingesetzt werden sollen. Zusätzlich zum dreidimensionalen Bezugsrahmen, der sich aus GPS-Messungen ergibt, soll auch das Landesnivellement (Haupt- und Nebenlinien) neu ausgeglichen und anschliessend ein neuer Bezugsrahmen LN95 für die Höhen eingeführt werden. Dabei soll weitgehend analog vorgegangen werden wie bei LV95.

Nachdem die Auswertungen der GPS-

Netze weitgehend abgeschlossen sind, hat LV95 einen Stand erreicht, der es erlaubt, einen grösseren Kreis von Interessenten darüber zu orientieren. Dies geschah einerseits mit drei Informations-tagungen an der ETH Zürich, der ETH Lausanne und an der Ingenieurschule beider Basel (IBB) in Muttenz. Zudem soll dieser VPK-Beitrag eine breitere Öffentlichkeit über diese Arbeiten informieren.

2. Vorgeschichte und Vorarbeiten

Ursprüngliche Arbeiten im letzten Jahrhundert

Die Ursprünge der Landesvermessung in der Schweiz gehen auf die erste Hälfte des letzten Jahrhunderts zurück [Wolf, 1879; Zölly, 1948; Matthias et al., 1980]. Damals wurden die ersten landesweiten geodätischen Netze realisiert (siehe Tab. 1).

Grundlagen der heutigen Landesvermessung

Die Grundlagen der heute offiziell gültigen LV (Landestriangulation LV03 und Landesnivellement LN02) wurden im ersten Drittel dieses Jahrhunderts durch die L+T erstellt (siehe Tab.2). Die Festlegung des geodätischen Datums, die Wahl der Kartenprojektion [Rosenmund, 1903] und die Wahl des Höhenhorizonts [Hilfiker, 1902] erfolgten kurz nach der Jahrhundertwende. Die Richtungsmessungen der Triangulation 1. und 2. Ordnung wurden 1923, die Triangulationen 3. Ordnung 1939, die Messung der Hauptlinien des Landesnivellements 1927 und die Verdichtung durch die Sekundärlinien 1933 vollendet [Zölly, 1948]. Mit der Publikation der Koordinaten und Höhen in den darauf folgenden Jahren wurden die geodätischen Grundlagen für die topographischen und kartographischen Arbeiten zur Erstellung des Landeskartenwerkes sowie für die AV in der Schweiz in guter Qualität und zweckmässiger Form für alle Benutzer zugänglich. Die Hauptanstrengungen galten fortan der Erhaltung, Nachführung und Erneuerung der Grundlagentnetze [Cha-

Epoche	Geodätische Arbeiten im letzten Jahrhundert
1828	Festlegung der Kegelprojektion von Bonne, Wahl des Ellipsoides von Schmidt
1832–39	«Triangulation primordial» (G.-H. Dufour) für die Dufourkarte 1:100 000
1862–91	Gradmessungstriangulation der Schweizerischen Geodätischen Kommission (SGK)
1880/81	Basismessungen in Aarberg, Weinfelden und Bellinzona
1864–91	«Nivellement de précision» der Schweizerischen Geodätischen Kommission

Tab. 1: Arbeiten der Schweizerischen Landesvermessung im letzten Jahrhundert.

blais et al., 1988]. Eine neue Aufarbeitung, strenge Ausgleichung und Dokumentation der Triangulation 1. und 2. Ordnung erfolgte ab 1985 im Rahmen der Diagnoseausgleichung (DIA93), welche in der Folge als wichtiges Element (DIA95) ins Projekt LV95 integriert wurde [Chablais et al., 1995].

Epoche	Geodätische Arbeiten als Grundlage der Landesvermessung
1902	Bestimmung des neuen Höhenausgangspunktes (Repère Pierre du Niton)
1903	Festlegung des Geodätischen Datums (Bessel Ellipsoid, 1841) und der Kartenprojektion (schiefsichtige, winkeltreue Zylinderprojektion)
1903–39	Landestriangulation (1. bis 3. Ordnung)
1903–33	Landesnivellement (Haupt- und Nebenlinien)

Tab. 2: Grundlagen der heutigen Landesvermessung.

Neuere geodätische Arbeiten

Unter der Obhut der Schweizerischen Geodätischen Kommission (SGK) sind in diesem Jahrhundert eine Vielzahl wissenschaftlicher Arbeiten entstanden, welche für die Geodäsie und die LV in der Schweiz unmittelbare Bedeutung haben [Schürer, 1986] (siehe Tab.3). An den Arbeiten haben sich verschiedene Institute, allen voran das Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich (IGP) beteiligt. Zu erwähnen sind in diesem Zusammenhang die astrogeodätischen Arbeiten der SGK für die Geoidbestimmung in der Schweiz, die elektronischen Distanzmessungen (EDM) in den Netzen der Landestriangulation durch das IGP und die Arbeiten im Rahmen der internationalen Zusammenarbeit für die Projekte RETrig (Réseau Européen de Triangulation) und REUN (Réseau Européen Unifié de Nivellement) [Chablais et al., 1988].

Der Einsatz der EDM bei der Nachführung der Triangulation 4. Ordnung ab ca. 1970 hatte zur Folge, dass an verschiedenen Orten grosse, bis anhin unentdeckt gebliebene Netzzwänge festgestellt wurden, welche Beträge von einigen Dezimetern erreichten. Diese Diskrepanzen schienen für eine moderne Vermessung nicht mehr akzeptabel. Die Ursache lag primär im Netzaufbau. Die ungünstigen topographischen Verhältnisse (Bewaldung im Mittelland und Jura) verhinderten zuweilen die direkte Verbindung zwischen benachbarten Triangulationspunkten (TP). Die Schwächen wurden zudem noch durch die unzulänglichen Berechnungsmethoden (Einzelpunkteinschaltung) verstärkt. Anfangs der 70er Jahre begann die L+T in der Folge mit den dringendsten Erneuerungsarbeiten, zunächst mit der gesamten Triangulation 3. Ordnung der Kantone Basel-Land und Basel-Stadt. Besonders prekär war die Situation im Kanton Waadt, wo die gesamte Triangulation 1. bis 3. Ordnung ab 1976 erneuert werden musste [Chablais und Schneider, 1979]. Im kleineren Rahmen mussten später auch Teilnetze 3. Ordnung in den Kantonen Aargau, Schaffhausen, St.Gallen, Genf und Jura erneuert werden. Bei den letzten Arbeiten ab 1989 kam auch GPS als neue Messmethode zum Einsatz.

Nachdem 1933 die Messung des Landesnivellements (Haupt-, Sekundär- und Ergänzungslinien) abgeschlossen war, wurden die Resultate den Benützern durch die Publikation der Eidg. Nivellementsverzeichnisse (ENV) zugänglich gemacht. Die Erhaltung des Netzes wurde durch die Nachführung und periodische Neupublikation der ENV-Dokumentation sichergestellt. Wie die Erfahrung bald zeigte, genügte die punktuelle Nachführung des Fixpunktnetzes nicht. Wegen lokaler und regionaler Höhenänderungen, deren Ursachen zunächst nicht bekannt waren,

Epoche	Geodätische Arbeiten im Zusammenhang mit der Landesvermessung	Institute
1916–48	Bestimmung von Geoidprofilen (Astronomische Nivellements)	SGK, IGP
1945–70	Astrogeodätische Messungen im Netz der Landestriangulation (Laplace-Azimute und Lotabweichungen)	SGK, IGP
1969–78	Bestimmung von Lotabweichungen und Berechnung eines astrogeodätischen Geoidmodells	SGK, IGP
1943–91	2. Messung des Landesnivellements (Hauptlinien)	L+T
1971 – heute	Kinematische Ausgleichung des Landesnivellements	L+T
1954 – heute	Arbeiten für RETrig und REUN	SGK, IGP, L+T
1963–87	EDM im Netz der Landestriangulation	SGK, L+T
1970 – heute	Teilerneuerungen der Landestriangulation (BL/BS, Westschweiz, SH etc.)	L+T

Tab. 3: Neuere geodätische Arbeiten im Zusammenhang mit der Landesvermessung.

wurden periodische Neumessungen ganzer Nivellementslinien im zeitlichen Abstand von einigen Jahrzehnten notwendig. Deshalb wurde 1943 mit der systematischen Neumessung des gesamten Nivellementsnetzes begonnen. Die zweite Messung des Hauptnetzes konnte 1991 abgeschlossen werden. Bis ca. 2001 sollen auch die wichtigsten Neben- und Ergänzungslinien neu gemessen werden. Mit der wiederholten Messung der Hauptlinien des Landesnivellements wurden gute Voraussetzungen für die Untersuchung von vertikalen Krustenbewegungen mit Hilfe von kinematischen Ausgleichungen des Netzes geschaffen [Gubler et al.,

1981; 1984]. Zwischen erster und zweiter Messung liegt eine Zeitspanne von 50–70 Jahren. Beide Messungen wurden mit dem gleichen Messverfahren und nach ähnlichen Spezifikationen gemessen und erreichen eine beachtliche Genauigkeit. Auf Grund der Binnenlage unseres Landes war es vorerst nur möglich, relative Höhenänderungen bezüglich einem hypothetischen Referenzpunkt in Aarburg zu bestimmen. Die Resultate der kinematischen Ausgleichung des LN geben die durchschnittliche Vertikalgeschwindigkeit der Fixpunkte bezüglich der Referenzgruppe wieder. Nach diesen Resultaten haben sich die Nivellementsunkte im

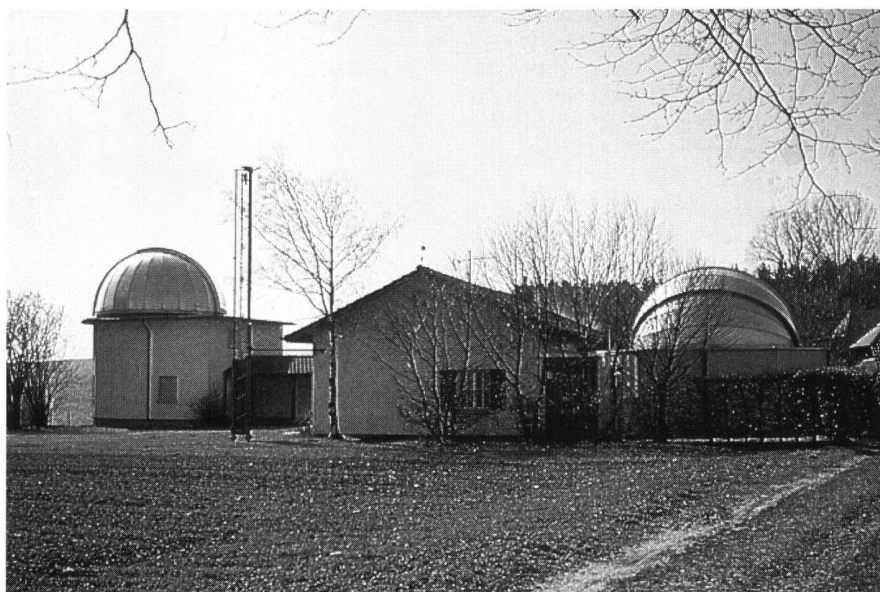


Abb. 1: Geostation Zimmerwald: Satellitenbeobachtungsstation (SLR), permanente GPS-Station.

Alpenraum gegenüber jenen im Mittelland um bis zu 1.5 mm/Jahr signifikant gehoben.

Neben den landesweiten Untersuchungen der Krustenkinematik anhand von LN-Messungen wurden in den letzten 25 Jahren auch verschiedene Detailstudien im Alpengebiet (Bahntunnels durch den Gotthard, Simplon und Lötschberg), im Jura (Nordschweiz, Vallée de Joux und Hauenstein) und im Rheingraben (Region Basel) durchgeführt [Gubler, 1981; Jeanrichard, 1986].

Entwicklung der Satellitengeodäsie und Anwendungen in der Schweiz

Die Satellitengeodäsie ermöglicht, geodätische Punkte über Distanzen von kontinentaler oder globaler Grössenordnung durch genaue Messungen miteinander zu verbinden. Durch regelmässige Messung eines weltumspannenden Netzes können die Stationskoordinaten und ihre zeitlichen Veränderungen in einem dreidimensionalen geozentrischen Koordinatensystem bestimmt werden. Damit lassen sich geodynamische Phänomene wie die Platten-tektonik, die Polbewegungen und die zeitliche Variation der Erdrotation beobachten. Daneben dienen die Messungen dazu, das Gravitationsfeld im erdnahen Raum zu bestimmen. Sie tragen damit wesentlich zur Berechnung von globalen Geoidmodellen bei.

Die Entwicklung und Anwendung der Satellitenmethoden in der Schweiz begann in den 60er Jahren am AIUB [Gurtner und Beutler, 1986; Wild und Gurtner, 1995]. Die anfänglichen photographischen Richtungsbeobachtungen wurden erstmals für die Berechnung eines weltumspannenden geodätischen Netzes [Schmid, 1972] verwendet. Der erste Laserdistanzmesser wurde 1975/76 in Zimmerwald in Betrieb genommen und ermöglichte den Wissenschaftlern des AIUB die Teilnahme an internationalen Messkampagnen mit Satellite Laser Ranging (SLR). Die frühen Arbeiten in der Satellitengeodäsie hatten ausschliesslich wissenschaftliche Bedeutung (siehe Tab.4).

Das erste weltweit nutzbare Satelliten-Navigationssystem TRANSIT ermöglichte praktische Messungen in den Netzen der Landesvermessung. In der Schweiz war es vor allem das IGP, welches zu Beginn der 80er Jahre erste wertvolle Erfahrungen mit dem Dopplermessverfahren sammelte [Wiget et al., 1985; 1986]. Die frühen Anwendungen der Satellitengeodäsie in der Schweiz dienten vor allem der Bestimmung genauer geozentrischer Koordinaten der Station Zimmerwald und damit der Herstellung des Bezuges der Schweizerischen Landesvermessung zu globalen Referenzsystemen. Praktisches Ergebnis waren erste Transformationsparameter für die Umrechnung von Schweizer Lan-

Epoche	Geodätische Arbeiten im Bereich Satellitengeodäsie	Institute
1965–75	Photographische Richtungsbeobachtungen in Zimmerwald	AIUB
1975 – heute	Satellite Laser Ranging (SLR) in Zimmerwald, mobile Station Generoso (Teilnahme an internationalen Messkampagnen)	AIUB, IGP
1980–86	Dopplermessungen (Navigationssystem TRANSIT) in den Netzen der Landesvermessung (nationale und internationale Messkampagnen)	IGP
1984 – heute	Einstieg in die GPS-Technologie: Software Entwicklung (Berner GPS-Software), Testmessungen und Evaluation (Testnetz Turtmann etc.)	AIUB SGK (AGr)

Tab.4: Frühe Arbeiten im Bereich der Satellitengeodäsie in der Schweiz.

deskoordinaten in globale Systeme (z.B. WGS-84).

Einführung der Satellitengeodäsie in die Landesvermessung

Die L+T betrachtete es seit den 70er Jahren als vordringliche Aufgabe, die Entwicklung der modernen geodätischen Messtechnik aktiv durch eigene Versuche und durch die Zusammenarbeit mit den Hochschulinstituten und der Instrumentenindustrie zu verfolgen. Nach den Methoden der EDM waren es die Anfänge der Satellitengeodäsie (Doppler), die Entwicklung der elektronischen Theodolite, die digitalen Nivellierverfahren und schliesslich die Anwendungen von GPS und DGPS, welche auf ihre Tauglichkeit für die LV untersucht werden mussten. Dabei kam es zu einer fruchtbaren Zusam-

menarbeit zwischen AIUB und L+T bei der Entwicklung der Satellitengeodäsie und der Einführung der neuen GPS-Technologie in die Praxis. Seitens des AIUB wurde vor allem eine Kooperation bei der Auswertung von GPS-Messungen bzw. bei der Entwicklung entsprechender Software sowie bei der Weiterentwicklung und beim gemeinsamen Betrieb der Geostation Zimmerwald (SLR und GPS-Permanentstation) angeboten. Die L+T wirkte bei der Bereitstellung eines geeigneten Testnetzes und der Durchführung von GPS-Testmessungen in Zusammenarbeit mit dem IGP massgebend mit.

Im Jahre 1985 wurde die Arbeitsgruppe GPS der SGK gegründet. An den Beratungen der Arbeitsgruppe nahmen Vertreter der Institute IGP-ETHZ, AIUB, IGM-EPFL, LAPETH (ETHZ) und CERN Genf,

Epoche	Erste geodätische Anwendungen von GPS in der Schweiz	Institute
1984	Grundlagnetz (LEP) des CERN (erste GPS-Messungen)	CERN, AIUB
1985	3D-Testnetz TURTMANN (Messkampagnen mit Macrometer, TI, Sercel etc.)	SGK (AGr)
1987	Kontrollnetz GRANIT (erste Zweifrequenzmessungen)	SGK (AGr)
1987	GPS-Profil Visp–Zermatt	SGK, IGP, L+T
1988	Installation (Mast) für permanente GPS-Messungen in Zimmerwald	L+T
1988	Antennentestnetz THUN	L+T
1988	RCM-Kontrollnetz «NEOTEKTONIK Nordschweiz»	L+T
1988	Kombiniertes Tunnelgrundlagnetz «BAHN2000: Wisenberg»	L+T
1988	Erweiterung Staumauer-Deformationsnetz «In den Schlägen (Sihlsee)»	L+T

Tab. 5: Erste Arbeiten mit GPS in der Schweiz.

der L+T sowie Vertreter der Instrumentenfirmen teil. Neben dem Gedankenaustausch über die laufende Entwicklung der GPS-Technik wurde beschlossen, GPS-Testmessungen in der Schweiz, insbesondere im alpinen Gebiet, durchzuführen und zu diesem Zweck ein Testnetz einzurichten. Nach der Erwägung verschiedener Varianten wurde entschieden, in Turtmann (VS) ein 3D-Testnetz in der typischen Topographie eines grossen Alpenteales mit grossen Höhendifferenzen aufzubauen.

Im Frühjahr 1985 begannen die Installation und die terrestrischen Messungen im Testnetz Turtmann [Jeanrichard et al., 1992]. Zur Bestimmung von Vergleichskordinaten («ground truth») in Turtmann wurden die bislang genauesten terrestrischen Messmethoden (Präzisions-EDM mit Mekometer, Terrameter, etc.) und zur Ausgleichung nach kleinsten Quadraten das 3D-Ausgleichsprogramm RAUMTRI [Schneider und Wunderlin, 1981] verwendet. Die ersten GPS-Messungen in Turtmann fanden im Herbst 1985 mit Empfängern vom Typ Macrometer V-1000, Sercel TR5S und Texas Instruments TI-4100 statt. Im Laufe der folgenden zehn Jahre fanden im Testnetz Turtmann 15 Messkampagnen mit insgesamt 17 verschiedenen Empfängertypen statt. Die GPS-Auswertungen der Testmessungen fanden grösstenteils am AIUB mit Hilfe der Berner GPS-Software statt. Die Erfahrungen und Resultate waren Gegenstand einer Vielzahl wissenschaftlicher Publikationen, welche weltweit Beachtung fanden [Jeanrichard et al., 1995]. Dabei arbeiteten verschiedene Organisationen aus dem In- und Ausland in vorbildlicher Weise zusammen.

Die aus den Arbeiten im Testnetz TURT-MANN gewonnenen Erkenntnisse waren für den Aufbau des GPS-Landesnetzes LV95 äusserst wertvoll. Anhand eingehender Messungen im Testnetz Turtmann evaluierte die L+T 1985-87 ihre erste (Trimble 4000SL/SLD) und 1992 ihre zweite Empfängerflotte (Trimble 4000SSE) für alle Anwendungen in der Landes- und Ingenieurvermessung. Neben der technischen Evaluation der GPS-Empfänger dienten die Testmessungen anfänglich vor allem der Gewinnung von praktischen Messerfahrungen und der Ausbildung des Personals. Aufgrund der Resultate aus den Messkampagnen zeigte sich sehr bald, dass die Bestimmung von genauen ellipsoidischen Höhendifferenzen mit GPS im Gebirge wegen der Refraktion in der Troposphäre sehr schwierig ist. Deshalb wurden Versuche mit verschiedenen Troposphärenmodellen in Angriff genommen.

Diagnoseausgleichung der Triangulation 1. und 2. Ordnung

Als weitere Vorarbeit für die neue Landesvermessung können die Arbeiten für

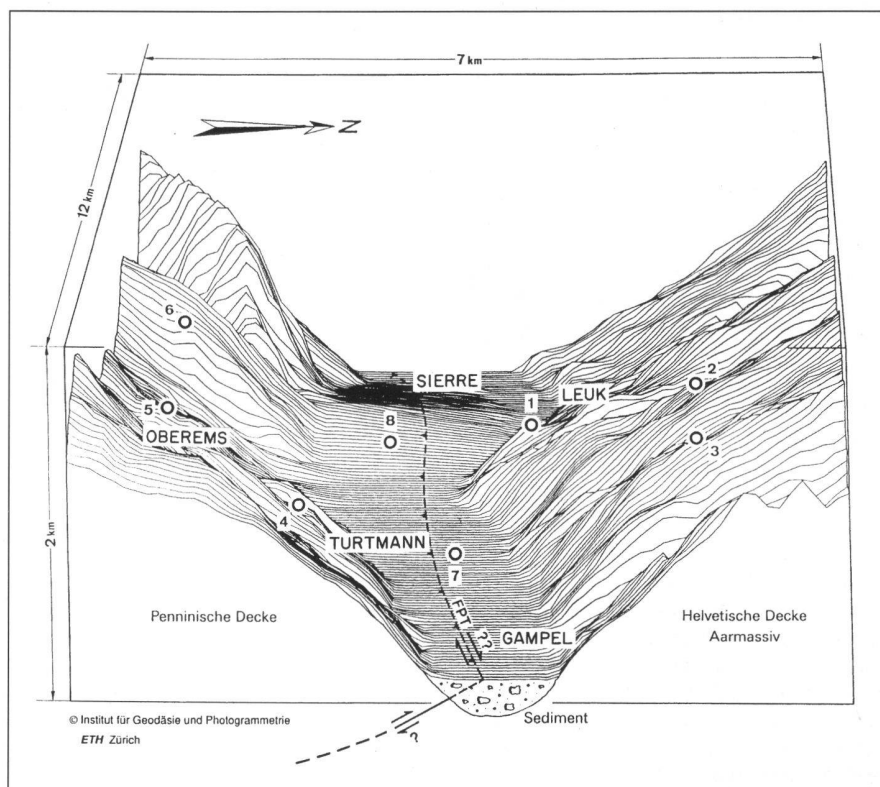


Abb. 2: 3D-Testnetz TURT-MANN (Testnetz für die Anwendung der GPS-Technologie im alpinen Raum).

die Diagnoseausgleichung der Triangulation 1. und 2. Ordnung betrachtet werden. Das 1985 in Angriff genommene Projekt dient den folgenden Zielen:

- Vollständige und einheitliche Dokumentation aller geodätischen Messungen im Triangulationsnetz 1. und 2. Ordnung
- Berechnung des bestmöglichen Koordinatensatzes aller TP 1. und 2. Ordnung mit zugehörigen Kovarianzen
- Beurteilung der Genauigkeit aller vorhandenen Beobachtungsgruppen und möglicher systematischer Fehleranteile
- Untersuchung der Verzerrungen im offiziell gültigen Koordinatenrahmen und Erprobung ihrer mathematischen Modellierung
- Verwendung als Testnetz für neue Messmethoden (namentlich GPS)
- Berechnung von Parametersätzen für die Transformation von schweizerischen in globale Bezugssysteme
- Untersuchung der horizontalen Komponenten von relativen Verschiebungen der obersten Erdkruste aus dem Vergleich der alten Messungen mit jenen der neuen Landesvermessung «LV95».

Für eine ausführliche Darstellung der Diagnoseausgleichung sei auf den Bericht aus der L+T Nr. 9 [Chablais et al., 1995] verwiesen.

3. Projektorganisation und Konzept

Projektorganisation

Im Jahre 1987 wurde das Projekt LV95 gestartet mit dem Ziel, bis 1995 einen neuen, dreidimensionalen Bezugsrahmen bereitzustellen. Eine Arbeitsgruppe, bestehend aus dem Kader der Abteilung Geodäsie und unter der Leitung von A. Wiget sollte dieses Projekt realisieren. Die Arbeitsgruppe bildete fünf Ausschüsse, die verschiedene Aspekte der Aufgabe weitgehend selbständig bearbeiteten (Abb. 3). In den Ausschüssen arbeiteten alle Ingenieure und Techniker der Abteilung Geodäsie mit, in jenem zum Thema Referenzsysteme zudem auch Dr. W. Gurtner vom AIUB.

Konzept

Nachdem die Ergebnisse der ersten Versuche und Testmessungen mit GPS das grosse Potential der neuen Methode deutlich gemacht haben, wurde ein Konzept für eine neue Landesvermessung 1995 «LV95» mit einem GPS-Landesnetz als Hauptstütze und einer optimalen Verbindung zu den globalen Bezugssystemen erarbeitet [Chablais, 1992; Gubler, 1992; Schneider, 1989, 1993; Schneider et al., 1995a]. Die Projektplanung sah ein etappenweises Vorgehen und eine Fertigstellung des neuen GPS-Landesnetzes im Laufe des Jahres 1995 vor. In einer nach-

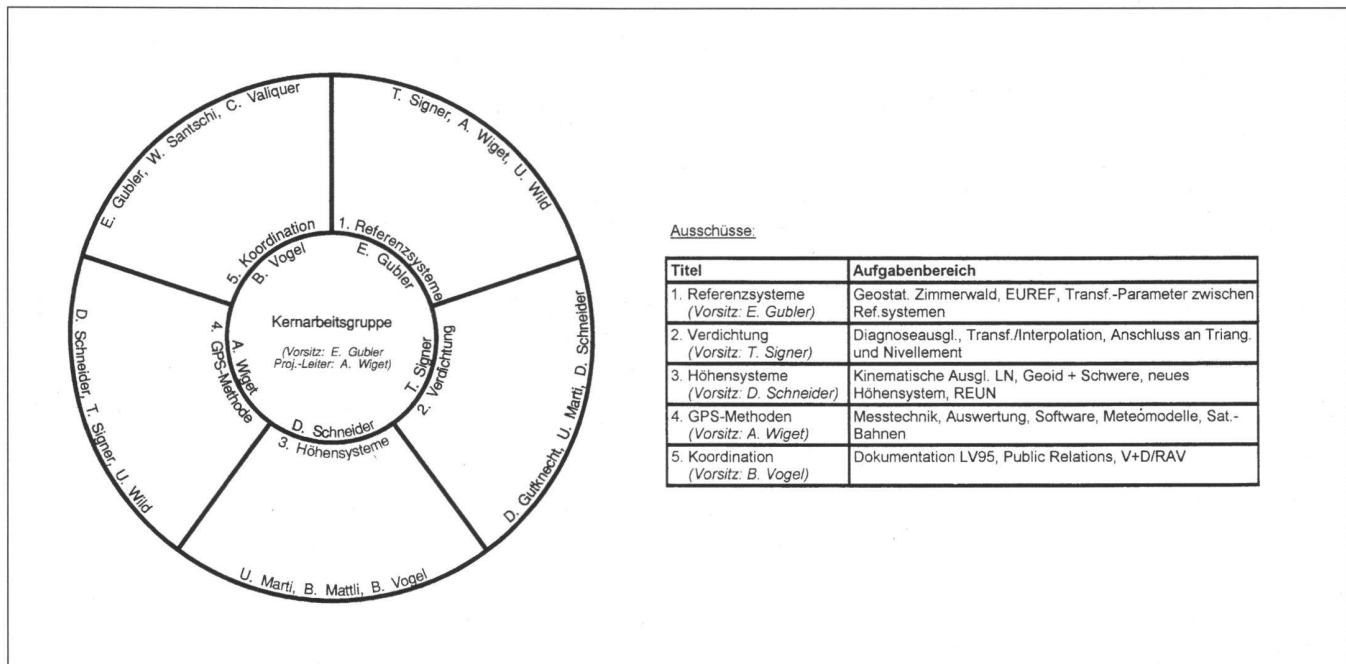


Abb. 3: Zusammenstellung und Aufgabenbereich der Arbeitsgruppe LV95.

folgenden Phase sollte schliesslich auch ein neues Höhengrundlagentnetz realisiert werden. Dank diesem etappenweisen Vorgehen schien es möglich, die neue Landesvermessung LV95 mit dem vorhandenen Personal und den begrenzten Budgetmitteln innert nützlicher Frist realisieren zu können.

Zielsetzungen und Anforderungen

Die modernen Methoden der Satellitengeodäsie erlauben dem Geodäten, neue Zielsetzungen anzugehen, welche mit der klassischen geodätischen Technik bisher kaum erreicht werden konnten. Ein Bezug der nationalen Grundlagentnetze zu den globalen Referenzrahmen lässt sich mit hoher Genauigkeit (im cm-Bereich) herstellen. Aus den wiederholten geodätischen Messungen hoher Präzision können zudem wertvolle Informationen für die Erdwissenschaften über die Bewegungen der Erdkruste gewonnen werden. Die relative Positionierung mit GPS ermöglicht eine rasche und rationelle Realisierung solcher Aufgaben.

Die Anforderungen an eine zeitgemässe Landesvermessung lassen sich aus den Bedürfnissen des grossen Benutzerkreises ableiten. Sie können wie folgt umschrieben werden:

- Bezug der lokalen (nationalen) zu den globalen geodätischen Referenzsystemen durch Anschlussmessungen der Landesnetze an die globalen Bezugsrahmen
- Erfassung der Bewegungen der obersten Erdkruste in Raum und Zeit durch die wiederholte 3D-Vermessung geeigneter, geodätischer Punktfelder (GPS-Landesnetze) mit höchster Präzision

- Bestimmung (Schätzung) der 3D-Koordinaten des Landesnetzes mit hoher Genauigkeit und Zuverlässigkeit sowie der Kovarianz des Koordinatensatzes und eines zugehörigen Geschwindigkeitsfeldes
- Verbindung zwischen dem Landesnetz und den Netzen der bestehenden Landesvermessung (LV03: Triangulation und LN02: Nivellement)
- Bestimmung von astrogeodätischen (Lotabweichungen) und gravimetrischen Daten (Schweremessungen) auf den Punkten des GPS-Landesnetzes, ausgewählten Punkten des Landesnivelementes und anderen Punkten
- Optimale Anschlussmöglichkeiten des Landesnetzes für Verdichtungsnetze der amtlichen Vermessung und für Grundlagentnetze grosser Ingenieurprojekte
- Strenges Höhenetz (orthometrisches und/oder Normalhöhenetz) in Raum und Zeit, realisiert durch die wiederholte Messung (Nivellement und Schwere), strenge Reduktion und kinematische Ausgleichung des Landesnivelements
- Genaues Geoidmodell (Zentimetergeoid), welches die Verknüpfung des 3D-Netzes (GPS-Landesnetz) mit dem Höhenetz (Landesnivelement) erlaubt.

Anschluss an globale Referenzsysteme

Die nationalen Landesvermessungen der Vergangenheit basieren allesamt auf lokalen geodätischen Referenzsystemen und lassen sich daher als «Insellösungen»

charakterisieren. Bei den Triangulationsnetzen war die Lagerung i.A. durch Festhalten astronomisch bestimmter Werte in einem oder mehreren Punkten realisiert worden, während das Höhendatum durch Anschlussmessungen an einen oder mehrere Meerespiegel festgelegt worden war. Erst durch die in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts durchgeführten kontinentalen Netzausgleichungen (RETrig und REUN) wurden erste Möglichkeiten für Anschlüsse an kontinentale oder globale Referenzsysteme (z.B. ED50) geschaffen. In der Schweiz haben diese Bezugssysteme und die zugehörigen Bezugsrahmen allerdings in der Vergangenheit kaum Anwendung gefunden.

Eine moderne Landesvermessung sollte in ein globales geodätisches Referenzsystem eingebunden werden. Die IAG-Subcommission for the European Reference Frame (EUREF) hat 1990 in Florenz und 1992 in Bern Beschlüsse zur Festlegung des European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS89) gefasst und dieses System zur Verwendung als einheitliche Grundlage für alle Landesvermessungen in Europa empfohlen [Boucher und Altamimi, 1992]. Mit diesem Bezugssystem und seiner Realisierung durch ein europaweites GPS-Netz (Bezugsrahmen EUREF89) liegt seit kurzem eine einheitliche Basis für den Anschluss der schweizerischen Landesvermessung vor. Zur Begründung der Forderungen nach einem einheitlichen, globalen Bezugsrahmen können folgende Punkte erwähnt werden:

- Der Bestand an raumbezogenen Daten, welche z.B. in Geographischen Informationssystemen (GIS) gehalten und vielseitig genutzt werden, nimmt stän-

dig zu. Im Zuge der europäischen Integration sind diese Datenbestände oft länderübergreifend angelegt und werden häufig über die Landesgrenzen hinaus ausgetauscht.

- Die Anwendung der modernen Methoden der Fahrzeugnavigation (auf dem Land, auf dem Wasser und in der Luft) erfordert den Bezug zu den weltweit gültigen Bezugssystemen (z.B. WGS-84).
- Global gelagerte Bezugssysteme erleichtern grenzüberschreitende Ingenieurprojekte.
- Die Festlegung internationaler Hoheitsgrenzen sollte in globalen Bezugssystemen/-rahmen erfolgen.

Der Anschluss an globale Bezugssysteme kann grundsätzlich auf zwei Arten erfolgen:

- Etablierung einer geodätischen Fundamentalstation (IERS «fiducial» station) ausgerüstet mit den relevanten Messmitteln der modernen Erdmessung («space geodesy») wie SLR (Satellite Laser Ranging) und evtl. LLR (Lunar Laser Ranging), GPS-Permanentstation und evtl. VLBI (Very Long Baseline Interferometry) sowie absolute und kontinuierliche relative Schwere messung (Erdzeitenstation und evtl. supraleitendes Gravimeter). Integration der Fundamentalstation in die Grundlagennetze der Landesvermessung (GPS-Landesnetz, Landesnivellement und Schweregrundnetz). Betrieb der Fundamentalstation mit der Zielsetzung einer bestmöglichen Ausbeute an qualitativ hochwertigen geodätischen Messdaten. Anschlüsse an weitere Fundamentalstationen (z.B. zwecks Orientierung).
- Integration der Landesnetze (GPS, Nivellement und Schwere) in die kontinentalen Referenznetze (EUREF, REUN etc.) durch wiederholte Anschlussmessungen auf den gemeinsamen geodätischen Punkten (EUREF-Stationen, etc.).

Die Geostation Zimmerwald als Fundamentalpunkt der modernen LV

Für die neue Schweizerische Landesvermessung LV95 wurde die Kombination beider Möglichkeiten (a und b) vorgesehen und damit eine redundante Lösung angestrebt. Die bestehende Satellitenstation Zimmerwald (siehe Abb. 1) wurde zu einer geodätischen Fundamentalstation (Geostation) ausgebaut und entsprechend betrieben [Wild und Gurtner, 1995]. Dazu war ein verstärktes Engagement der Abteilung Geodäsie (L+T) und eine enge Kooperation mit dem AIUB notwendig. Die L+T hat mit der Einrichtung einer permanenten GPS-Station (1992) und mit der Übernahme des SLR-Betriebes durch Beobachter der L+T (1992) sowie beim

Ersatz des bisherigen Laserteleskopes durch ein neues wesentlich leistungsfähigeres System (1995/96) einen beachtlichen Effort geleistet.

Der kinematische Aspekt von «LV95»

Die modernen Erkenntnisse der Erdwissenschaften bezüglich der Bewegungen (Kinematik) der Erdkruste (Plattentektonik) führten auch zu einer neuen Betrachtungsweise der geodätischen Netze. Im Gegensatz zur Philosophie vor hundert Jahren werden heute die geodätischen Festpunktfelder als zeitlich veränderlich betrachtet. Die Positionen der Punkte werden nach den neuen Konzepten der 4D-Geodäsie jeweils durch räumliche Koordinaten mit ihren zeitlichen Ableitungen (Geschwindigkeiten) bezogen auf einen Referenzzeitpunkt t_0 beschrieben. Die festgestellten Bewegungen der geodätischen Punkte im Raum werden zur Untersuchung der dynamischen Phänomene der Tektonik beigezogen.

Bei der Anlage der Netze ist es sehr wichtig, dass die Standortwahl der Punkte nach dem Kriterium der geologischen Eignung bezüglich dieser neuen Zielsetzung geschieht. Für LV95-Punkte kommen deshalb in erster Linie Standorte im anstehenden, stabilen Fels und in zweiter Linie gut fundierte Lagen im stabilen Lockergestein in Frage. Von grosser Wichtigkeit ist dazu die Dauerhaftigkeit der Punkte und die Möglichkeit der Rekonstruktion aus den sekundären Zeichen (Rückversicherung).

Zur Beschreibung der Bewegungen werden kinematische Modelle verwendet. Das diskrete Geschwindigkeitsfeld, wie es etwa bei der kinematischen Ausgleichung des Landesnivellements verwendet wurde, ist ein besonders einfaches Beispiel eines solchen Modelles. Andere Möglichkeiten wie etwa die Beschreibung durch ein Straintensorfeld [Schneider, 1982] eignen sich besonders für 2D- und 3D-Untersuchungen. Das Konzept von LV95 beinhaltet auch die Festlegung von kinematischen Modellen und die Schätzung von zugehörigen Parametern.

Die Genauigkeit der Schätzung der kinematischen Parameter hängt nicht nur von der Messgenauigkeit sondern auch von der Häufigkeit und zeitlichen Verteilung der Wiederholungsmessungen ab. Für das GPS-Landesnetz LV95 wird ein Messintervall von fünf bis zehn Jahren für die Folgemessungen angenommen. Je nach der Grössenordnung der z.Z. noch unbekannten Horizontalkomponenten der Relativbewegungen kann ein Zyklus für die Wiederholungsmessungen angesetzt werden.

Die Erkenntnisse über die Kinematik der obersten Erdkruste sind für die Erdwissenschaft von grosser Bedeutung. Umgekehrt dienen die kinematischen Modelle

auch der Landesvermessung, indem erst durch die korrekte Modellierung eine gemeinsame Ausgleichung von Messungen aus unterschiedlichen Zeitepochen ohne Genauigkeitsverlust möglich ist. Dieser Zusammenhang ist bei der kinematischen Ausgleichung der Messungen des Landesnivellements aus dem ganzen zu Ende gehenden Jahrhundert drastisch erkennbar.

Bezug zur bisherigen Landesvermessung

Das neue GPS-Landesnetz hat nur wenige gemeinsame Punkte mit den bisherigen Grundlagennetzen LV03 und LN02. Um trotzdem eine enge Verbindung und damit Transformationsmöglichkeiten vom einen ins andere Bezugssystem bereitzustellen, wurden direkte Verbindungen zur Triangulation 1. und 2. Ordnung und zum Landesnivellement vorgesehen. Durch die Gesamtausgleichung des GPS-Netzes (inkl. Verbindungsnetze) mit der Diagnoseausgleichung einerseits und mit der kinematischen Neuausgleichung des LN andererseits lassen sich auch die Punkte der bisherigen Landesnetze in den neuen Bezugssystemen bestimmen.

Die Gesamtausgleichung (LV95 + DIA93) soll einerseits genähert als klassische Lageausgleichung (Programm LTOP) [Gubler, 1995] und andererseits streng als 3D-Ausgleichung (Programm RAUMTRI) [Schneider und Wunderlin, 1981; Schürer, 1993] erfolgen, wobei in beiden Fällen GPS-Koordinatensätze als fingierte Beobachtungen (aus den ursprünglichen GPS-Phasendifferenzen abgeleitet) eingeführt werden. Das Modell der 3D-Ausgleichung erlaubt die Einführung der vollständigen Kovarianzmatrix der GPS-Lösung und ermöglicht damit eine strenge Schätzung der 3D-Koordinaten sowie der zugehörigen Kovarianzen.

Realisierung eines neuen Zentimetergeoids

Die Methoden der Satellitengeodäsie liefern 3D-Koordinaten im euklidischen Raum und davon abgeleitet ellipsoidische Höhen. Im Gegensatz dazu beziehen sich die auf Nivellementsnetzen beruhenden klassischen Höhensysteme i.A. auf das Geoid (oder evtl. Quasigeoid). Als zugehörige Höhensysteme kommen strenge orthometrische (oder Normalhöhenysteme) in Frage. Die Nivellementsnetze werden auch in Zukunft praktische Bedeutung behalten, da die Nivellementsmethode auch in schwierigen topographischen Verhältnissen (insbesondere im Siedlungsgebiet) mit einfachen Mitteln genaue Höhenmessungen erlaubt und ideale Anschlusspunkte für die praktische Vermessung liefert. Bei den Verdichtungsnetzen im schwach besiedelten Raum sind allerdings Ersatzlösungen

gen mittels Höhenbestimmung durch GPS-Netze denkbar. Um die orthometrischen Höhen (resp. Normalhöhen) der Nivellementsnetze mit den ellipsoidischen Höhen aus dem GPS-Landesnetz vergleichen und kombinierte Netze ausgleichen zu können, ist ein genaues Geoidmodell (resp. Quasigeoidmodell) notwendig. In der Schweiz ist seit 1978 ein gutes astrogeodätisches Geoidmodell [Gurtner, 1978] verfügbar. Dieses Modell hat bei vielen geodätischen Arbeiten wertvolle Dienste geleistet. Den hohen Anforderungen, welche die Verknüpfung einer kinematischen Neuausgleichung des Landesnivellements mit dem GPS-Landesnetz stellt, kann dieses Modell allerdings nicht genügen.

Das IGP, die L+T und das AIUB haben ein Projekt für ein neues Zentimetergeoid [Marti und Kahle, 1995] in Angriff genommen, welches nun zu einem wesentlichen Bestandteil des LV95-Konzeptes wird. Das neue Modell basiert hauptsächlich auf astro-geodätischen Beobachtungen, welche in den letzten Jahren mit Hilfe von Zenitkamera-Messungen wesentlich verdichtet worden sind (mittlerer Abstand der Messpunkte ca. 20 km). Daneben sollen 2500 Schwerewerte in die Berechnung einbezogen werden. Im Alpengebiet ist die Modellierung der topographischen Massen sowie der wichtigsten Massenanomalien eine besondere Herausforderung. Mit dem neuen digitalen Geländemodell (DHM25) mit 25 m Maschenweite, welches z.Z. an der L+T durch Digitalisierung der Landeskarten 1:25 000 entsteht, ist eine wichtige Grundlage für die Berechnung gegeben. Das neue Geoidmodell, welches mit der bekannten «Remove-Restore»-Technik und Kollokation entsteht, soll eine relative Genauigkeit (1σ) der Geoidundulationen von 2 bis 3 cm garantieren.

Verknüpfung von GPS-Landesnetz und Landesnivellement

Die relative Positionierung mit GPS liefert Koordinatendifferenzen im dreidimensionalen Raum. In lokalen ebenen Netzen ist dabei die Höhengenaugkeit aus geometrisch/physikalischen Gründen nur geringfügig schlechter als die Lagegenauigkeit. Beim GPS-Landesnetz mit grossen Höhendifferenzen und grösseren Entfernungen ist der Einfluss der troposphärischen Refraktion auf die Höhenunterschiede allerdings nicht mehr vernachlässigbar. Die Anwendung der Standardatmosphärenmodelle bei der GPS-Auswertung, wie sie in den kommerziellen Programmen verwendet werden, genügen den Anforderungen i.A. nicht mehr [Rothacher et al., 1993]. Im Konzept von LV95 ist deshalb die Modellierung der troposphärischen Refraktion zur Reduktion der Messgrössen enthalten. Neben den auf den Stationspunkten gemessenen Boden-

Meteowerten werden dabei die Daten von ca. 70 landesweit verteilten automatischen Meteostationen (ANETZ) der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt (SMA) sowie tägliche Ballonsondierungen in Payerne verwendet.

Durch die Verknüpfung des neu ausgeglichenen Landesnivellements (kinematisch) mit dem GPS-Landesnetz unter Verwendung des Zentimetergeoids soll als weiteres Produkt von LV95 ein GPS-gestütztes Landeshöhenetz (LN95) entstehen.

4. Bezugssysteme und Bezugsrahmen

Das bis heute gültige geodätische Bezugssystem für die Landesvermessung in der Schweiz (CH1903) wurde durch die Wahl des Bessel-ellipsoids und seine Lagerung im Fundamentpunkt (alte Sternwarte von Bern) anfangs dieses Jahrhunderts festgelegt. Zudem wurde durch die Einführung des Projektionssystems der Schweizerischen Landesvermessung (winkeltreue, schiefachsige Zylinderprojektion) die geeignete Grundlage für die Realisierung des Systems und seine Anwendung in der amtlichen Vermessung geschaffen (siehe auch Kap.2). Daneben wurde als Höhenbezug der Ausgangshorizont des «Repère Pierre du Niton» (RPN) auf einem Felsblock im Hafen von Genf mit einem vom Mittelwasser des Mittelmeeres im Hafen von Marseille (Pegel) abgeleiteten Höhenwert von 373.6 m angenommen [Hilfiker, 1902]. Mit der Realisierung der Grundlagennetze (Triangulation 1. bis 3. Ordnung und Landesnivellement) in den darauffolgenden Jahrzehnten wurden die Bezugsrahmen (von kleinen Ausnahmen abgesehen) überall durchgesetzt. Im vorliegenden Bericht werden das bisher gültige schweizerische Bezugssystem (geodätische Datum) mit CH1903 und die Lage- und Höhenbezugsrahmen (offizieller Koordinatensatz der Landestriangulation bzw. Gebrauchshöhen des Landesnivellements) mit LV03 bzw. LN02 bezeichnet.

Die beschriebenen geodätischen Grundlagen (CH1903 und die winkeltreue schiefachsige Zylinderprojektion) sind seit rund einem Jahrhundert im Gebrauch. Sowohl die Ellipsoidlagerung wie auch die Kartenprojektion haben sehr günstige Eigenschaften (z.B. kleine Abweichung Geoid – Ellipsoid und geringe Projektionsverzerrungen). Vermessungsfachleute aller Ausbildungsstufen sind mit dem Gebrauch dieses Systems und im besonderen mit den Reduktionen der Messgrössen aufs Ellipsoid und ins Landeskordinatensystem vertraut. Die nötigen Reduktionsformeln sind in vielen Rechenprogrammen integriert und erlauben den rationellen Umgang mit dem System. Für die Vermessungen in der Schweiz gibt es kaum vorteilhafte Alternativen zu CH1903 und

der schiefachsigen Zylinderprojektion. Es ist offensichtlich, dass für die Belange der AV das bestehende Bezugssystem und die Landeskartenprojektion wenn immer möglich beibehalten werden sollten. Falls eine Neudefinition des Systems notwendig wird, sollten die Veränderungen zumindest für die Anwendungen in der AV vernachlässigbar klein bleiben. Anders sieht es bei den Bezugsrahmen (den Realisierungen des Bezugssystems) aus. Dort sind Koordinatenänderungen bis 2 m unvermeidlich.

Für die Landesvermessung ist mit dem Einzug der «Space Geodesy» (insbesondere GPS) eine neue Ära angebrochen. Die Messmethoden von kontinentaler Reichweite ermöglichen die Verwendung von globalen Bezugssystemen und den Aufbau von weltweiten terrestrischen Netzen und Bezugsrahmen. Die wiederholten Präzisionsmessungen der modernen Geodäsie erlauben zudem die Untersuchung von tektonischen Bewegungen der obersten Erdkruste und der Erde als ganzem. Die Modellierung dieser Kinetik wird umgekehrt zur wichtigen Voraussetzung für die optimale Ausschöpfung der Genauigkeit der Messmethoden. Es ist deshalb nicht erstaunlich, dass z.Z. in Europa (und weltweit) die meisten Landesvermessungen auf eine neue geodätische Basis gestellt werden. Mit der Definition des European Terrestrial Reference Systems 1989 (ETRS89) hat die EUREF-Kommission in Europa einen Standard geschaffen, der einen einheitlichen Bezug zu allen modernen Landesvermessungen auf dem Kontinent erlaubt. Durch diese Vereinheitlichung wird der Wunsch nach cm-genauen Übergängen zwischen den Bezugssystemen von Nachbarländern zur Wirklichkeit.

Das Bezugssystem (reference system) für eine zeitgemässe Landesvermessung in Europa sollte folgende Anforderungen erfüllen [Gubler und Schneider, 1994; Schneider et al., 1995b]:

- Bezug durch eine wohldefinierte mathematische Transformation zum globalen, in Europa verwendeten Bezugssystem ETRS89 und damit zum weltweit gültigen «Conventional Terrestrial System» ITRS
- Keine Abweichung im Massstab und möglichst geringe Abweichung in der Orientierung des Systems gegenüber dem ETRS89
- Festlegung eines geeigneten kinematischen Modells, das die zeitliche Variation im Raum beschreibt
- Bezug zum bisherigen geodätischen Datum CH1903 der bestehenden Landesvermessung LV03 durch eine einfache mathematische Transformation
- Ergänzung des Systems durch ein strenges Höhensystem (orthometrisches und/oder Normalhöhen-system)

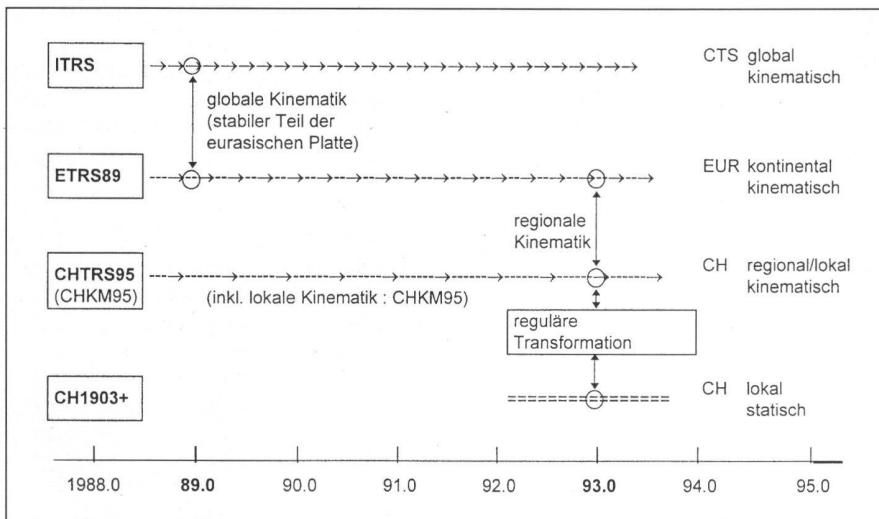


Abb. 4: Verknüpfung der global und lokal gelagerten Bezugssysteme.

mit Bezug zu den Systemen der Nachbarländer (Anschluss an REUN)

Die divergierenden Anforderungen, welche die wissenschaftliche Geodäsie und die Landesvermessung einerseits sowie die AV andererseits stellen, führte zur Idee einer dualen Systemwahl mit der gleichzeitigen Festlegung je eines lokal gelagerten und eines global gelagerten Bezugssystems für die Schweiz (siehe Schema in Abb. 4) [Schneider et al., 1995b]. Für die Bedürfnisse der Geodäsie und Landesvermessung sowie für die anforderungsreichen Anwendungen der Ingenieurvermessung (Grossprojekte wie BAHN 2000 und Alp Transit) wird das global gelagerte, terrestrische Bezugssystem CHTRS95 und als erste Realisierung sein Bezugsrahmen CHTRF95 eingeführt.

Dieses System ist eng an ETRS89 angelehnt und beinhaltet auch ein kinematisches Modell. Die Positionen der geodätischen Punkte werden als zeitlich veränderlich und nicht mehr als statisch («Fixpunkte») betrachtet. Die Transformation von CHTRF95-Koordinaten in den europäischen Koordinatenrahmen ist einfach und mit cm-Genauigkeit möglich. Das Bezugssystem CHTRS95 ist dreidimensional kartesisch und mit dem System WGS-84 im Rahmen dessen Genauigkeit identisch.

Im Gegensatz dazu wird für die Belange der AV das bisherige Bezugssystem und der zugehörige Landeskoordinatenrahmen LV03 möglichst beibehalten. Mit der neuen Bezeichnung CH1903+ wird lediglich auf eine neue Festlegung des Fundamentalphunktes (realer Punkt in Zimmerwald anstelle des ideellen Punktes bei der alten Sternwarte in Bern) hingewiesen. Diese Datumsänderung wurde aber so gewählt, dass sie sich in der AV nicht auswirkt. Als Realisierungen dieses Systems werden der neu berechnete Koordinatenrahmen LV95 (GPS-Landesnetz) und die neuen streng zu berechnenden Höhen

LN95 (neues Landeshöhennetz) betrachtet. Der Übergang von LV95- in CHTRF95-Koordinaten (und damit in den europäischen Bezugsrahmen und ins globale System ITRS) ist mit einer klar festgelegten, einfachen mathematischen Transformation und mit cm-Genauigkeit möglich. Dabei werden sowohl der Massstab wie auch die Orientierung, wie sie im GPS-Netz bestimmt wurden, beibehalten. Die Koordinatenunterschiede zwischen LV95 und LV03 variieren in Richtung und Betrag von 0.0 m in der Region Bern bis zu ca. 1.6 m im äussersten Südosten der Schweiz und bestätigen die für die damalige Zeit gute Qualität der alten Landesvermessung (siehe Abb.13).

Die Koordinaten der geodätischen Punkte im Bezugsrahmen LV95 werden im CHTRS95 für den Referenzzeitpunkt $t_0 = 1993.0$ berechnet und wie bisher in der AV üblich als statisch betrachtet. Die Bezeichnungen für die Koordinatenwerte im Bezugsrahmen LV95 (E: Ostwert, N: Nordwert, etc.) unterscheiden sich von den alten Bezeichnungen LV03 (y, x) deutlich. Zur Vermeidung von Verwechslungen mit LV03-Koordinaten wird zu den y- und x-Werten eine Konstante addiert. Die Trennung der Bezugsrahmen in Lage (LV95) und Höhe (LN95) soll grundsätzlich beibehalten werden.

Höhensysteme und Höhennetze

Neben dem GPS-Landesnetz wird auch das Landesnivelllement (LN) z.Z. vollständig neu bearbeitet. Das bisherige Gebrauchshöhensystem (LN02) mit seinen Ursprüngen im 19. Jahrhundert wird noch in diesem Jahrhundert durch ein streng berechnetes Landeshöhennetz (LN95) ersetzt. Dem Prinzip der dualen Systemwahl mit einem global und einem lokal gelagerten Bezugssystem folgend werden auch zwei verschiedene Höhenbezugssysteme eingeführt. Das Höhensystem von CHTRS95 wird ins europäische

Netz REUN integriert. Die primären Resultate im Bezugsrahmen CHTRF95 sollen in der Form von Schwerepotentialwerten verwaltet werden. Die Benutzer aus den Fachgebieten Geodäsie, Erdwissenschaften, Landes- und Ingenieurvermessung werden wahlweise orthometrische Höhen oder Normalhöhen abrufen können. Zusätzlich werden Vertikalgeschwindigkeiten und Kovarianzinformationen verfügbar sein. Im Unterschied dazu wird das zu CH1903+ festgelegte Höhensystem orthometrische Höhen enthalten (Bezugsrahmen: LN95), welche auf den Referenzzeitpunkt $t_0 = 1993.0$ festgehalten werden. Der grosse Benutzerkreis aus der AV und aus vielen anderen Anwendungsgebieten muss sich somit i.A. nicht mit zeitlich veränderlichen Punkthöhen befassen.

Das neue Netz entsteht durch die kinematische Neuausgleichung des Landesnivelllements verstärkt durch Höhendifferenzen aus dem GPS-Landesnetz LV95. In Analogie zu LV95 wird auch hier der neue Fundamentalphunkt in Zimmerwald anstelle des Repère Pierre du Niton als realer Höhenbezugspunkt eingeführt, wobei auch diese Systemänderung für den Benutzer in der AV nicht bemerkbar sein wird.

5. Transformationen

Im Folgenden sollen die Transformationen von den beschriebenen Referenzsystemen und -rahmen zu den übergeordneten Systemen (ETRS89, ITRS89) kurz vorgestellt werden. Die Transformation zwischen dem bisher verwendeten Rahmen LV03 und dem neuen Rahmen LV95 ist im Kap.9 beschrieben. Allgemein kann die Beziehung zwischen zwei verschiedenen Referenzsystemen durch sieben Transformationsparameter einer drei-dimensionalen Helmert-Transformation beschrieben werden (drei Translationen, drei Rotationen, ein Massstab). Damit können die kartesischen geozentrischen Koordinaten vom einen ins andere System transformiert werden. Dies geschieht nach folgender Formel:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} + S \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

Transformationen zu den übergeordneten Systemen

Das europäische System ETRS89 wurde so festgelegt, dass es zur Epoche 1989.0 (d.h. am 1. Januar 1989) mit dem globalen System ITRS identisch war. Seither entfernte es sich aufgrund der Bewegung der eurasischen Kontinentalplatte immer mehr vom ITRS. Mathematisch ist dies

Kein Problem ist die Bestimmung der Koordinaten des Fundamentalpunkts im CHTRS95. Dazu müssen lediglich die aus den SLR- und GPS-Messungen erhaltenen Koordinaten im ITRS89 mit den bekannten Algorithmen ins CHTRS95 transformiert werden. Die Lagekoordina-

Hauptanwendung dieser Transformation ist die Auswertung von GPS-Messungen deren Lösung anschliessend in den LV95-Rahmen transformiert werden soll. Dieses Vorgehen kann jedoch auf alle geodätischen Netze, welche im CHTRS95 vorliegen, verallgemeinert werden. Eigentlich sollten GPS-Auswertungen im ITRS89 durchgeführt werden. Da dieses sich jedoch von CHTRS95 nur um wenige



Dezimeter unterscheidet, ist es für lokale Netze bis zu etwa 100 km Ausdehnung zulässig, die Auswertungen direkt im CHTRS95 auszuführen. Somit braucht sich ein typischer GPS-Anwender nicht um die übergeordneten Netze zu kümmern. Als ersten Schritt muss ein Benutzer evtl. seine CHTRS95-Lösung mit Hilfe des Geschwindigkeitsmodells in die Epoche 1993.0 transformieren. Anschliessend erfolgt die Transformation mittels einer Translation ins CH1903+. Die Umrechnung in Projektionskoordinaten E und N, sowie die ellipsoidische Höhe erhält man wie bisher durch die Umrechnung mit den bekannten Formeln. Die orthometrische Höhe schliesslich berechnet man durch Subtraktion der Geoidundulationen aus dem neuen Geoidmodell.

6. Installation des GPS-Netzes

Aufbau

Den im Konzept von LV95 formulierten Zielsetzungen entsprechend (siehe Kap.3) muss das neue GPS-Landesnetz landesweit als ideales Anschlusspunktfeld für bestehende und zukünftige Vermes-

sungen dienen. Dies bedingt über die ganze Schweiz eine homogene Punktverteilung, in der die Punkte auf bequeme Weise erreicht werden können (Zugänglichkeit).

Im Hinblick auf tektonische Untersuchungen durch die geplanten Wiederholungsmessungen ist für die neuen LV95-Punkte eine besonders stabile und dauerhafte Kennzeichnung in geeigneten geologischen Formationen gefordert. Die Zugänglichkeit und die Kennzeichnung der meisten alten Triangulationspunkte entspricht diesen modernen Anforderungen nicht. Aus diesem Grund kam eine mit GPS zu realisierende Erneuerung der bestehenden Landestriangulation 1./2. Ordnung nicht in Frage. Statt dessen wurde ein von der bestehenden Landestriangulation weitgehend unabhängiges Netz mit 104 Hauptpunkten aufgebaut.

Natürlich musste der Bezug zur bestehenden Landesvermessung und zur amtlichen Vermessung hergestellt werden. Dank der modernen GPS-Methode konnte aber unabhängig von zwingenden Sichtverbindungen zu den Anschlusspunkten eine nahezu ideale Netzanlage realisiert werden, welche eine komfortable Anzahl Anschlusspunkte sowohl an die Landestriangulation (LFP1) (Abb. 5), an die

Amtliche Vermessung (LFP2) wie auch an das Landesnivellement (HFP1) (Abb. 6) aufweist. Je nach den kommenden Bedürfnissen ist vorgesehen, dieses Hauptnetz mit gezielten Verdichtungspunkten zu ergänzen (siehe Kap.9).

Sämtliche LV95-Punkte wurden zuverlässig an die benachbarten LFP1/2 angeschlossen, um für jeden Punkt die offiziellen Landeskoordinaten im Rahmen LV03 verfügbar zu haben. Damit sind diese Punkte ebenso wie die LFP2 als Anschlusspunkte der Amtlichen Vermessung zu benutzen.

Rekognoszierung

In der Absicht, rezente Krustenbewegungen zu entdecken, aber auch wegen der recht hohen Erstellungskosten für ein neues Landesnetz wurde der dauerhaften und exakten Kennzeichnung der LV95-Punkte sehr grosse Beachtung geschenkt, umso mehr als hier von Anfang an vorgesehen war, mit höchster Präzision zu messen. Zur Beurteilung der Stabilität wurden spezielle Messinstrumente beigezogen, welche Rückschluss auf die Qualität des Felsuntergrundes gaben. Dabei wurde auch ein dynamisches Stabilitätsmessgerät eingesetzt, welches nach den Ideen von Dr.

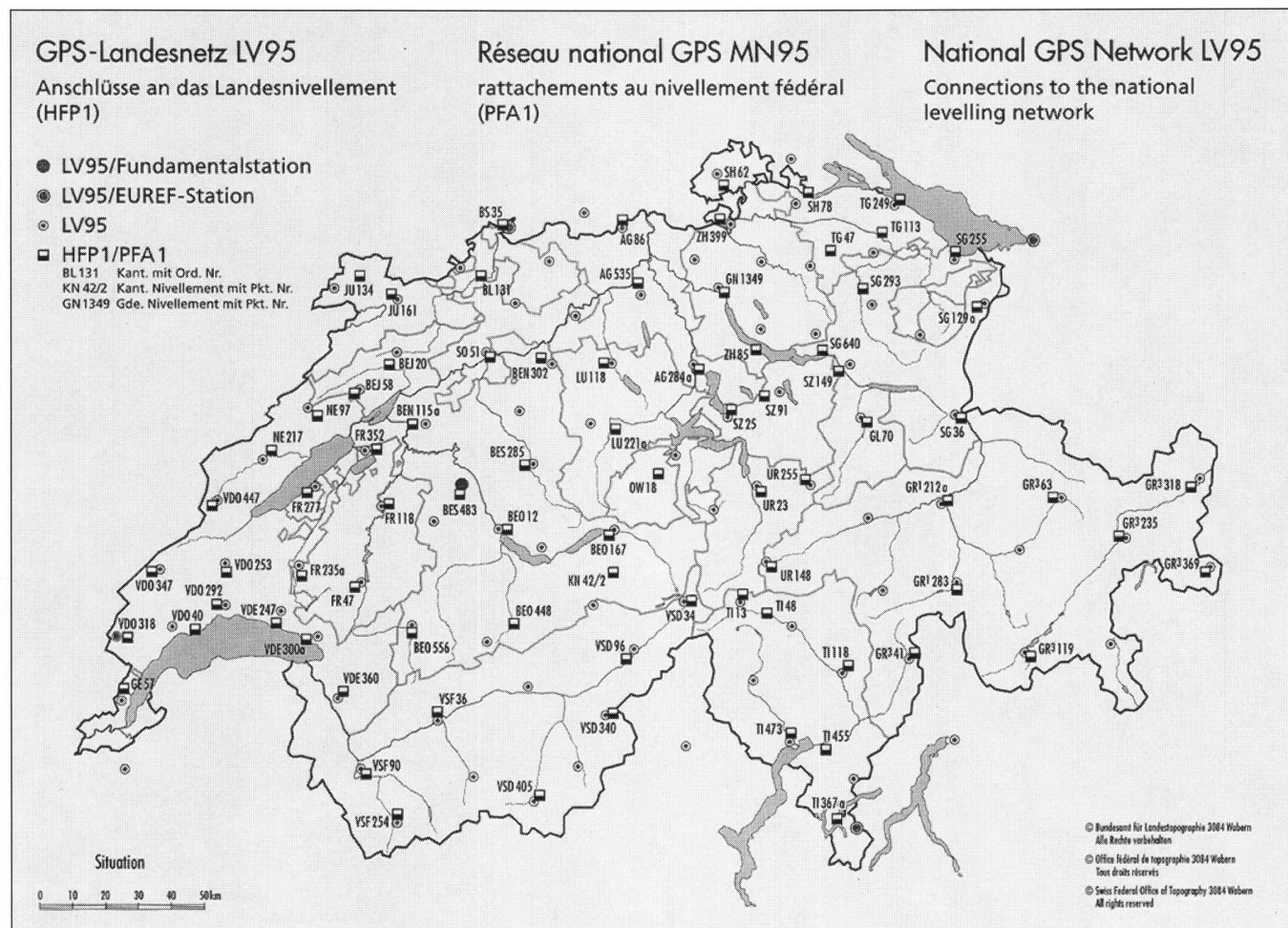


Abb. 6: LV95-Netz mit den Anschlüssen an das Landesnivellement.



Abb. 7: Einsatz des dynamischen Stabilitätsmessgerätes (nach Pavoni).

N. Pavoni (ETHZ) entwickelt worden war (Abb. 7). Die Kriterien für die Wahl der Punktstandorte sind in der Tab. 6 angegeben.

Netzdichte

mittl. Punktabstand: 15–25 km (Mittelland); 20–30 km (Alpen)

Sicherheit, Dauerhaftigkeit

nach Möglichkeit in öffentlichem Grund, ausserhalb von Bauzonen

Stabilität

wo möglich im anstehenden, festen Fels oder gut fundiert im Lockergestein

Zugänglichkeit

mit Fahrzeug oder Bergbahn während des ganzen Jahres

Satellitenempfang

freier Horizont ab 15–20° Höhenwinkel, keine Störsignale (Sender) in der näheren Umgebung

Tab. 6: Kriterien für die Punktstandorte.

Schon vor der Rekognoszierung im Gelände wurde versucht, eine homogene Punktverteilung über die ganze Schweiz zu erreichen, wobei zusammen mit dem beratenden Geologen Dr. P. Heitzmann von der Landeshydrologie und -geologie geologisch stabile Regionen gesucht wurden. Daraufhin wurden die Punkte nach den erwähnten Anforderungen rekognosziert. Im gleichen Zeitpunkt wurden die Eigentumsverhältnisse abgeklärt und von den



Abb. 8: Idealer Standort des LV95-Punktes «Maloja».

betroffenen Personen eine schriftliche Einwilligung eingeholt. Anschliessend konnten die Punkte definitiv gekennzeichnet werden.

Punktkenzeichnung

Im Alpengebiet sowie im Jura konnten die meisten Punkte direkt in anstehendem Fels gekennzeichnet werden. Hauptsächlich im Mittelland oder in Regionen, wo kein Fels an der Oberfläche gefunden werden konnte, wurden die speziellen Kappenbolzen in einem massiven Betonsockel eingebetoniert. Falls man beim Versetzen dieser Sockel dennoch auf Fels stiess, wurden diese entsprechend verankert. Einige Punkte wurden auch auf massiven Bauwerken wie Reservoirs installiert. Die mei-

sten Punkte mit Betonsockel sind zusätzlich mit einem Schacht geschützt. Als exzentrische Rückversicherung sind alle Hauptpunkte mit sekundären Zeichen versehen. Diese bestehen aus unterirdischen Bodenplatten oder speziellen Exzenterbolzen und dienen einer allfälligen Rekonstruktion der Hauptpunkte. Sie sind entsprechend genau eingemessen. Die folgende Tabelle 7 gibt einen Überblick über Anzahl und Art der Kennzeichnung:

Kappenbolzen direkt im Fels	34 Punkte
Sockel auf Fels verankert	22 Punkte
Sockel ohne Fels	31 Punkte
massive Bauten	17 Punkte

Tab. 7: Art der Kennzeichnung.

Dokumentation

Die LV95-Punkte werden in die bestehende Dokumentation der LFP1 und LFP2 übernommen (Punktkarte und Punktprotokolle) und erhalten dort die offiziellen Landeskoordinaten im Bezugsrahmen LV03. Für die Zwecke der Landesvermessung und Spezialarbeiten existiert zusätzlich ein separates Protokoll, welches die weiteren Angaben betreffend LV95 enthält.

7. Messkampagnen

Die Messungen mussten in vier Messkampagnen von jeweils zwei Wochen zwischen 1989 und 1992 unterteilt werden, weil abgesehen von der beschränkten Satellitenkonstellation weder das Personal noch die logistische Kapazität an der L+T vorhanden waren, um das Netz kurz-



Abb. 9: Kappenbolzen als typische Kennzeichnung eines LV95-Punktes.

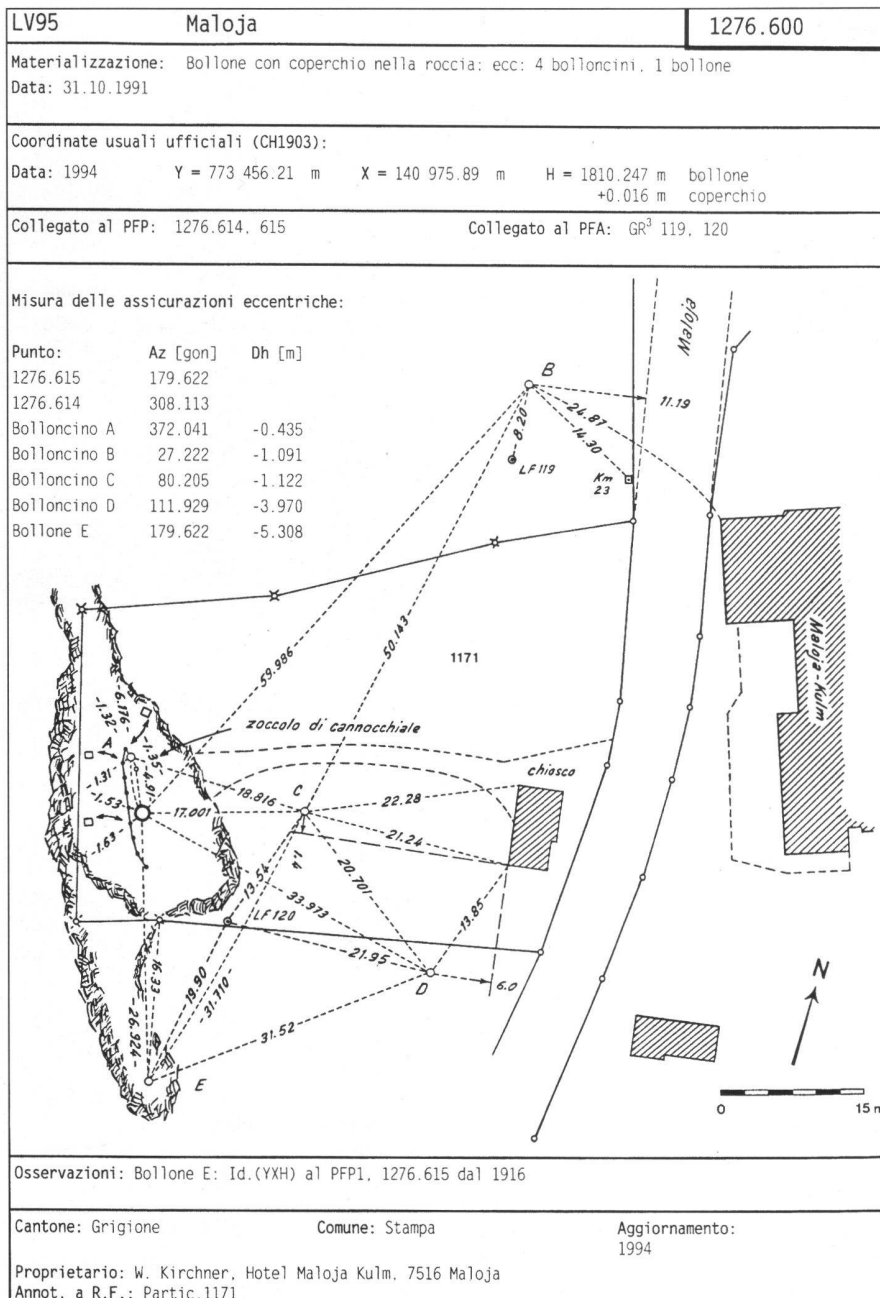


Abb. 10: Punktprotokoll des LV95-Punktes «Maloja».

fristig aufzubauen und zu messen. Es wurde darauf geachtet, dass die Teilnetze optimal miteinander verbunden wurden, indem jedes Teilnetz an die Fundamentaltalstation Zimmerwald, an mindestens zwei weitere EUREF-Punkte und an die Nahtpunkte zu den anderen Teilnetzen angeschlossen worden war (Abb. 11). Auf den Neupunkten kamen ausschliesslich Zweifrequenz-Empfänger vom Typ Trimble 4000 SLD, STD oder SST zum Einsatz, wobei auf jedem Punkt des Netzes mindestens zweimal unabhängig stationiert und die Meteowerte Druck, Temperatur und Feuchtigkeit erhoben wurden. Dank der guten Zusammenarbeit mit dem Niedersächsischen Landesverwaltungsamt in Hannover und dem Bundesamt für

Eich- und Vermessungswesen in Wien konnten jeweils bis zu 13 Empfänger eingesetzt werden. Die Messungen fanden in der Nacht statt, weil dann die störenden Einflüsse der Ionosphäre auf die GPS-Messungen geringer sind als tagsüber. Die Messdauer richtete sich damals noch nach der Verfügbarkeit der Satelliten, wollte man doch mindestens Signale von vier bis fünf Satelliten gleichzeitig messen. Anfänglich betrug die Messdauer einer Session noch ca. fünf Stunden, 1992 standen bereits ca. 8 Stunden als ideales Messfenster zur Verfügung. Im August 1992 fand zusätzlich im Rahmen der Epoch'92-Kampagne des «International GPS Service for Geodynamics (IGS)» eine fünftägige Messkampagne auf allen

EUREF-Punkten der Schweiz (resp. des angrenzenden Auslandes) statt. Da dann zumal erstmals weltweit eine grosse Zahl permanent messender GPS-Stationen, mit derer Hilfe hochpräzise Satellitenbahnen gerechnet werden konnten, in Betrieb war, konnte die Genauigkeit unter den EUREF-Punkten nochmals gesteigert werden.

In den Teilnetzen 1989 und 1990 wurden gleichzeitig mit den Hauptpunkten die Anschlüsse an die Landestriangulation 1./2. Ordnung und an das Landesnivelement gemessen. In den Netzen 1991 und 1992 (Gebirge) war dies wegen der Zugänglichkeit der Anschlusspunkte nachts nicht mehr möglich, so dass dafür zwei separate Kampagnen nötig wurden.

8. Auswertung

Die GPS-Messungen wurden laufend direkt nach jeder Messkampagne durch die L+T ausgewertet. Ebenso wie die Messungen waren auch die Berechnungen auf höchste Genauigkeit und Zuverlässigkeit ausgelegt. In enger Zusammenarbeit mit dem Astronomischen Institut der Universität Bern (AIUB) und dem Institut für Geodäsie und Photogrammetrie (IGP) der ETH Zürich wurden die Auswertalgorithmen und -Modelle stets verbessert und dem neusten Stand angepasst. Besonderes Gewicht wurde dabei auf die Eliminierung oder Reduktion von systematischen Fehlereinflüssen gelegt, soweit diese nicht bereits durch optimale Messanordnungen im Feld vermieden werden konnten. Im folgenden werden nach einer kurzen Beschreibung der Software namentlich die Satellitenbahnen, die ionosphärische und troposphärische Refraktion sowie die Abweichungen der Antennen-Phasenzentren näher erläutert.

Software

Es wurde ausschliesslich die Berner GPS Software des AIUB in den Versionen 3.2 bis 3.5 verwendet [Rothacher, 1992; Rothacher und Schär, 1994]. Diese Software ist für Präzisionsauswertungen von statischen GPS-Netzen lokalen, landesweiten bis kontinentalen Ausmasses geeignet. Sie ist modular aufgebaut und besteht aus über 50 Programmen. Sowohl bezüglich der Modellierung wie auch der Auswertelogik ist sie sehr umfassend konzipiert. So können u.a., je nach Einsatz, folgende Parametertypen eingeführt werden:

- Geozentrische Stationskoordinaten
- Phasenmehrdeutigkeiten («Ambiguity-Parameter»)
- Satelliten-Bahnparameter
- Lokales Ionosphären-Modell
- Lokales Troposphären-Modell
- Phasenzentren der Antennen
- Uhrfehler (Satelliten und Empfänger)

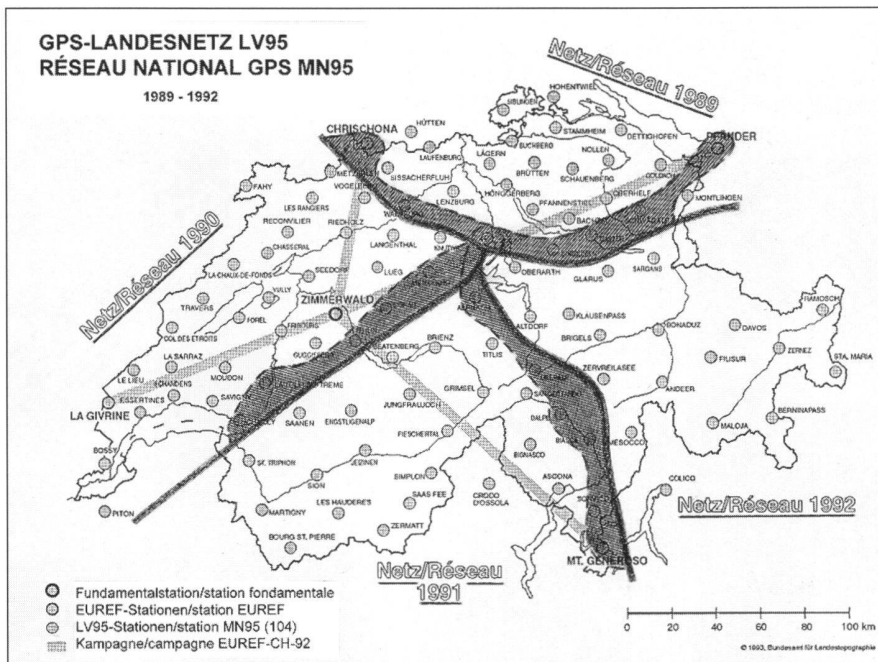


Abb. 11: Unterteilung des GPS-Netzes in vier Sektoren mit Angabe der Überlappungszonen.

Als Beobachtungen werden Code- und Phasenmessungen auf den L_1 - und L_2 -Signalen der GPS-Satelliten (sowie verschiedene Linearkombinationen davon) verarbeitet. Die Daten aus mehreren Sessoren (Messtagen) und Kampagnen können streng nach der Methode der kleinsten Quadrate in einer Gesamtlösung ausgeglichen werden.

Satellitenbahnen

Die Satellitenbahnen spielen eine entscheidende Rolle für die Genauigkeit der GPS-Berechnungen. Aus diesem Grund wurden in allen Kampagnen von LV95 nur a posteriori bestimmte, präzise Bahnen verwendet. Bis 1992 wurden die «precise ephemerides» von der U.S. Defense Mapping Agency bezogen. Zu Vergleichszwecken wurden zudem am AIUB mit Daten von europäischen Trackingstationen (CIGNET) eigene präzise Bahnen berechnet. Seit 1992 werden ausschliesslich die im Rahmen des International GPS Service for Geodynamics (IGS) vom Center for Orbit Determination (CODE) am AIUB täglich berechneten präzisen Bahnen verwendet [Beutler et al., 1994]. Die Genauigkeit (1σ) dieser präzisen Bahnen beträgt etwa 20 cm in den Satellitenpositionen. Im weiteren werden stets die a posteriori bestimmten Erdrotationsparameter des IERS verwendet.

Ionosphärische Refraktion

Beim Durchgang der GPS-Satellitensignale durch die Erdatmosphäre werden die Mikrowellen in den verschiedenen Schichten unterschiedlichen Refraktionsinflüssen ausgesetzt. Die Ionosphäre ist

der Teil der Erdatmosphäre von etwa 50 km bis 1000 km Höhe, in dem ionisierte Gase und freie Elektronen auftreten. Generell kann gesagt werden, dass der refraktive Einfluss der Ionosphäre zu einer Verkürzung der gemessenen GPS-Distanzen führt, welche je nach dem Stand im elfjährigen Sonnenfleckenzyklus (letztes Maximum ca. 1990) und der Tageszeit in unseren Breitengraden 5–15 m betragen kann. Daraus resultieren Massstabsfaktoren bis zu 4 ppm (oder mm/km). Da diese Störungen in der Nacht geringer sind, wurden für LV95 alle Messungen im Hauptnetz nachts durchgeführt.

Die Ionosphäre ist allerdings ein dispersives Medium, d.h. die Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Wellen und damit auch der Refraktionsindex sind von der Frequenz abhängig. Damit kann der Einfluss durch geschickte Kombination der Trägerphasen L_1 und L_2 praktisch eliminiert werden, was man sich aber mit einem gegenüber L_1 um den Faktor 3 höheren Messrauschen erkauft. Diese sog. ionosphärenfreie Linearkombination L_3 wurde bei allen Messungen mit Zweifrequenzen-Empfängern gebildet, d.h. auf allen Basislinien im Hauptnetz und seit 1992 auch auf allen Anschlüssen und Verdichtungsmessungen. Für die früheren Anschlussmessungen an die Triangulation und ans Landesnivelement, auf welchen bis 1991 noch mehrheitlich Einfrequenz-Empfänger eingesetzt waren, wurde jeweils aus den gleichzeitigen Zweifrequenzmessungen pro Session ein sog. deterministisches Ionosphärenmodell nach dem «single layer»-Modell berechnet [Wild und Beutler, 1991]. Damit konnte auch auf diesen Basislinien der

Störeinfluss der Ionosphäre auf unter 1 ppm begrenzt werden.

Troposphärische Refraktion

Als Troposphäre wird der unterste Teil der Erdatmosphäre bis in ca. 15 km Höhe bezeichnet, in dem die Wellenausbreitung vor allem durch die Dichte der Luft und den Wasserdampf beeinflusst wird. Im Gegensatz zur Ionosphäre ist in der Troposphäre der Brechungsindex im L-Band des Mikrowellenspektrums (GPS-Messungen auf $L_1 = 1.5$ GHz und $L_2 = 1.2$ GHz) praktisch unabhängig von der Frequenz. Die Brechungsverhältnisse sind für beide Frequenzen vom Druck, der Temperatur und der Feuchtigkeit entlang des Signalweges in der Troposphäre abhängig. Die Gesamtverzögerung beträgt ca. 2.3 m. Zur Elimination der troposphärischen Refraktion, welche sich in der Positionsbestimmung mit GPS aufgrund der Satellitenkonstellation vor allem auf die Höhe auswirkt, stehen verschiedene Varianten offen [Geiger et al., 1995]. Entsprechend den Möglichkeiten der Berner GPS Software wurden in LV95 sowohl die Modellierung wie auch die Schätzung aus den GPS-Messungen selber angewendet.

Bei der Modellierung werden das Refraktionsfeld und damit die Weglängenkorrekturen dreidimensional mit Hilfe von meteorologischen Modellen berechnet. Ausgehend von Standard-Atmosphärenmodellen (z.B. Saastamoinen), welche für lokale Anwendungen und geringe Höhendifferenzen meist ausreichend sind, können diese durch die Berücksichtigung von aktuellen meteorologischen Messungen (Druck, Temperatur, Feuchtigkeit) verfeinert werden. Die L+T hat beim Institut für Geodäsie und Photogrammetrie (IGP) und beim Laboratorium für Atmosphärenphysik der ETHZ (LAPETH) ein Ressortforschungsprojekt in Auftrag gegeben mit dem Ziel, operationelle Verfahren zu entwickeln, um die Daten der ca. 70 Messstationen des Automatischen Netzes (ANETZ) der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt (SMA) und die täglichen Ballonsondierungen der SMA in Payerne für diese Zwecke verwenden zu können. Damit sollten insbesondere auch die eigenen, wegen lokalen bodennahen Störungen oft problematischen Meteomessungen an den GPS-Stationen überflüssig werden. Das Modell ist in [Geiger et al., 1995] beschrieben. Die reine 3D-Interpolation wurde inzwischen unter Einbezug der zeitlichen Variabilität zu einem 4D-Kollokationsmodell erweitert. Es wurden alle Teilkampagnen damit neu berechnet, eine abschliessende Beurteilung ist aber noch nicht möglich. Immerhin lassen erste Resultate hoffen, dass damit die Wiederholbarkeiten der ellipsoidischen Höhendifferenzen zwischen den Kampagnen gegenüber dem reinen Standardmodell verbessert werden können.

Zusätzlich zu den aus Modellen gerechneten Weglängenkorrekturen werden in allen Auswertungen von LV95 lokale Troposphärenparameter (auch Troposphärenzenitkorrekturen oder «zenith path delays» genannt) aus den redundanten GPS-Messungen selber bestimmt. Für jede Station (ausser für eine Referenzstation) wird pro ca. 4 Stunden Messdauer ein solcher zusätzlicher Parameter geschätzt.

GPS-Antennen

Für lokale und regionale Präzisions-GPS-Netze müssen die elektronischen Phasenzentren der Antennen möglichst exakt bekannt sein. Zwar haben die eingesetzten «Microstrip»-Antennen ein in Lage und Höhe mit Submillimeter-Genauigkeit definiertes mechanisches Zentrum. Das elektronische Phasenzentrum kann gegenüber diesem jedoch um einige Millimeter verschoben sein und zwar unterschiedlich für die L_1 - und die L_2 -Signale und erst noch in Abhängigkeit von der Satellitengeometrie [Geiger, 1988]. Um systematische Einflüsse infolge fehlerhafter Offsets zu vermeiden, wurden diese kleinen Korrekturen für jede einzelne Antenne in sog. Antennentests bestimmt. Ein Beispiel einer solchen Bestimmung wurde bereits in [Wiget et al., 1991] gegeben.

Für LV95 wurden alle eingesetzten Empfänger und Antennen vorgängig jeder grösseren Kampagne, mindestens aber einmal pro Jahr, auf der Teststrecke der L+T in Thun kalibriert. Die Antennen wurden zu diesem Zweck zwangszentriert auf Stahlpfählen montiert, deren relative Lage und Höhe mit terrestrischen Methoden auf 0.3 mm resp. 0.1 mm (a posteriori Genauigkeit 1σ) eingemessen worden waren. An zwei aufeinanderfolgenden Tagen (oder Nächten) wurden jeweils zwei GPS-Sessions unter derselben Satellitenkonstellation und von derselben Messdauer gemessen wie in der anschliessenden Kampagne im LV95-Netz. Daraus konnten schliesslich gemittelte relative Ablagen der Phasenzentren gegenüber den Nominalwerten einer Referenzantenne im Submillimeterbereich bestimmt werden, welche für die aktuelle Konstellation und Sessionsdauer repräsentativ waren. Von der in der neusten Version der Berner GPS Software enthaltenen Möglichkeit, die Offsets gar in Funktion der Elevation und des Azimutes zu bestimmen und zu korrigieren, wurde noch nicht Gebrauch gemacht.

Ausgleichung und Lagerung

Die Datenaufbereitung umfasste mehrere Programmschritte, in denen u.a. die Offsets der Empfängeruhren pro Messepoche auf besser als eine Mikrosekunde genau geschätzt wurden. Danach wurden für jede Session die unabhängigen Basislinien zwischen den gemessenen Stationen definiert und die sog. «single differ-

rences» (zwischen den zwei Endstationen) gebildet, wobei die Anzahl der gemeinsamen Messungen maximiert und die Länge der Basislinien minimiert wurde. Weitere Schritte der Vorverarbeitung waren die Entdeckung und Eliminierung von groben Ausreissern und die Korrektur von Phasensprüngen («cycle slips»), womit schliesslich für alle Sessions bereinigte kontinuierliche Phasendifferenzen vorlagen.

Die eigentliche Auswertung wurde mit dem Hauptprogramm GPSEST durchgeführt, in dem alle aufgesetzten Parameter, insbesondere natürlich die gesuchten Stationskoordinaten, nach der Methode der kleinsten Quadrate optimal geschätzt wurden. Die Beobachtungen wurden als Dopplendifferenzen zwischen jeweils zwei Stationen und zwei Satelliten formuliert. Die Korrelationen zwischen den Frequenzen L_1 und L_2 sowie zwischen den Basislinien einer Session wurden im stochastischen Modell berücksichtigt. Das Intervall zwischen den Messepochen war normalerweise 15 Sekunden, bei ganztägigen Sessions (z.B. in den EUREF-Kampagnen) 30 Sekunden. Die minimale Satellitenelevation betrug 15° .

Alle Kampagnen wurden zuerst sessionsweise (tageweise) ausgewertet. In einem ersten Schritt wurden dabei unter Verwendung der sog. «wide lane» Linearkombination L_5 die Phasemehrdeutigkeiten («ambiguities») von L_2 in Funktion von L_1 bestimmt. Die Wellenlänge von L_5 beträgt 86 cm resp. im Falle der «squaring» Technik unter S/A-Bedingungen («selective availability») mit halben Wellenlängen noch 43 cm. Dadurch ist die Fixierung der Ambiguity-Parameter leichter als direkt auf der Frequenz L_2 , deren Wellenlänge lediglich 24 cm beträgt. Im zweiten Schritt wurden dann in der ionosphärenfreien Linearkombination L_3 die L_1 - (und somit auch die L_2 -) Mehrdeutigkeiten bestimmt, d.h. auf ganze Zahlen fixiert.

Dies gelang in den Teilnetzen ohne Probleme. Offenbar blieb der Einfluss der Ionosphärenaktivität dank den Nachtmessungen in Grenzen. Auf langen Basislinien über 50 km und insbesondere bei der Auswertung der 24-Stunden-Daten in der EUREF-CH Kampagne mit Distanzen bis zu 130 km, bei welchen die volle Variation der Ionosphärenintensität spürbar wurde, führte allerdings erst die Einführung eines zeitvariablen Ionosphärenmodells zum Erfolg [Mervart et al., 1994].

Die ionosphärenfreien L_3 -Observablen mit fixierten L_1 - und L_2 -Ambiguity-Parametern, welche für Netze der Grössenordnung von LV95 die bestmögliche Lösung darstellen, wurden schliesslich in die Gesamtausgleichung über alle Messtage aller Kampagnen eingeführt. In der Tab. 8 sind einige Kennwerte der Auswertungen der Hauptkampagnen von LV95 zusammengestellt. Die Gesamtausgleichung umfasst 300 Stationen in 90 Sessions mit ca. 4.4 Mio. Beobachtungen (Phasendifferenzen) und 2600 Parametern (900 Koordinaten und 1700 Troposphärenparameter).

Die Lagerung erfolgte im Referenzrahmen ITRF93. Die GPS-Station Zimmerwald, welche in allen grösseren Sessions mitgemessen wurde, wurde als Fundamentaltalpunkt auf ihren offiziellen Koordinaten in ITRF93 festgehalten. Damit existieren dort keine Translationen gegenüber dem globalen Referenzrahmen. Zudem wurden die ITRF93-Koordinaten der IGS-Stationen Wettzell (D) und Graz (A), welche in den EUREF-Kampagnen mitgemessen worden waren, mit sehr kleinen mittleren Fehlern in die Ausgleichung eingeführt. Zusammen mit den präzisen GPS-Bahnen, welche seit 1992 ebenfalls im ITRF vorliegen, definieren sie die Orientierung des Netzes. Der Massstab von LV95 schliesslich ist durch die GPS-Messungen selber vorgegeben und entspricht über die Definition der Lichtgeschwindigkeit der

Kampagne	Jahr	Monat	Anzahl Stationen	Anzahl Empfänger	Sessions		Satelliten	
					[T]	[h/T]	Anzahl	S/A
LV95-89	1989	Sept.	47	12	10	4	7	off
LV95-90	1990	Okt.	75	13	9	7	8	off
LV95-91	1991	Sept.	51	13	9	8	10	off
LV95-92	1992	Sept.	31	11	9	8	12	on
EUREF-CH	1992	Aug.	7	7	5	23	18	on

Teilnetz	Anzahl Doppel-differenzen	gelöste Ambiguities [%]	Sigma der Phasendifferenzen [mm]	rms der Helmert-Transformation			
				1. Teil auf 2. Teil (3 Translationen)			
				gemeins. Punkte	Nord [mm]	Ost [mm]	Höhe [mm]
LV95-89	227 328	100	3.2	20	6.1	5.1	24.7
LV95-90	508 966	100	3.3	22	4.0	4.9	25.4
LV95-91	544 859	100	4.1	32	6.9	6.2	26.2
LV95-92	381 499	100	3.4	18	3.5	5.0	15.6
EUREF-CH	145 382	75	4.1	7	4.1	1.4	16.4

Tab. 8: Einige Kennwerte der Hauptkampagnen und Teilnetze von LV95.

Meterdefinition. Als Kontrolle der Lagerung stehen die vier EUREF-Stationen an der Peripherie der Schweiz (Chrischona, Pfänder, La Givrine, Monte Generoso) zur Verfügung.

Beurteilung der Genauigkeit

Da ein genauerer Referenzrahmen fehlt, mit dem das LV95-Netz verglichen werden könnte, stehen lediglich zwei Möglichkeiten zur Evaluation verschiedener Modellvarianten sowie für die abschliessende Beurteilung der Genauigkeit des Gesamtnetzes zur Verfügung:

- (1) Die innere Genauigkeit der GPS-Auswertungen (a posteriori rms)
- (2) Die Wiederholbarkeit der Resultate durch Vergleich verschiedener Tageslösungen und Teilkampagnen

Die innere Genauigkeit der GPS-Lösungen ist erfahrungsgemäss zu optimistisch und erlaubt nur eine relative Aussage über die Qualität verschiedener Lösungen. Die Genauigkeit der GPS-Messungen (1σ der einfachen Phasendifferenzen) liegt bei allen Kampagnen im Bereich zwischen 3 mm und 5 mm und beträgt in der Gesamtlösung 4 mm. Die formalen Fehler (1σ) der GPS-Koordinaten werden in der Grössenordnung von 1 mm für die Lage und 2 mm für die Höhe ausgewiesen.

Die Wiederholbarkeit der Koordinaten zwischen Teillösungen wird meist mittels Ähnlichkeits-Transformationen (Helmert-Transformationen) untersucht. Da die räumliche Orientierung der Teilnetze durch die präzisen Bahnen praktisch vorgegeben ist und der Massstab aus GPS im absoluten Sinne definiert ist, lassen wir bei den Transformationen lediglich drei Translationen der Schwerpunkte der Teil-

Stationsname	Residuen in [mm]		
	Nord-Süd	Ost-West	Höhe
Chrischona	-7.9	4.8	28.0
Pfänder	8.3	1.1	-3.1
Zimmerwald	-3.4	2.2	10.7
La Givrine	-5.7	-8.9	14.3
Monte Generoso	8.7	0.9	-50.0
rms pro Komponente	7.9	5.2	30.0

Tab. 9: Lage- und Höhenresiduen aus der Helmert-Transformation (nur drei Translationen) der kombinierten Teilkampagnen 1989–1992 auf die Lösung der Kampagne EUREF-CH92.

netze untereinander zu. Zur Beurteilung der Genauigkeit werden dann die Restfehler (Residuen) an den Koordinaten herangezogen. Verschiedene Transformationen sowohl zwischen Tageslösungen innerhalb einer Kampagne wie auch zwischen Teilkampagnen ergeben mittlere Fehler an den Lagekoordinaten von 3–7 mm (pro Komponente) und 1–3 cm an den Höhen (Tab. 8). Durch die Ausgleichung im Gesamtnetz ist somit mit Genauigkeiten von derselben Grössenordnung oder besser zu rechnen. In Tab. 9 ist als Beispiel die drei Parameter Helmert-Transformation der Kombination der Teilkampagnen 1989–1992 auf die Lösung von EUREF-CH92 gezeigt und in Abb. 12 sind die Lage-Residuen auf den fünf EUREF-Stationen graphisch dargestellt.

Zur Zeit werden noch Studien im Zusammenhang mit den Meteomodellen gemacht, um insbesondere die Genauigkeit der Höhen im Hinblick auf die Kombination

mit dem Landesnivellement zu verbessern. Dennoch kann bereits heute zusammenfassend festgehalten werden, dass mit CHTRF95 ein Bezugsrahmen realisiert werden konnte, dessen «absolute» globale Lagerung in Zimmerwald gegenüber ITRF bzw. ETRF auf ca. 1 cm genau (1σ) bekannt ist. Die Orientierung ist auf besser als $0.1''$ oder 0.03 mgon und der Massstab auf besser als 0.1 ppm (je 1σ) bestimmt. Die relative Genauigkeit (1σ) zwischen zwei beliebigen Hauptpunkten im LV95-Netz beträgt im CHTRF95 mindestens 1 cm in der Lage und ca. 2–3 cm in der (ellipsoidischen) Höhe. Es ist vorgesehen, dass in Zukunft durch Wiederholungs- und Verdichtungsmessungen die Genauigkeit im Rahmen eines kinematischen Modells sogar noch gesteigert werden kann und für alle Hauptpunkte allmählich individuelle Geschwindigkeitsvektoren geschätzt werden können.

9. Verdichtung von LV95 und Anwendungen

a) Verdichtung von LV95

Im Rahmen der Messkampagnen 1989–92 wurden 104 Punkte des neuen GPS-Netzes LV95 erstellt. Diese werden als LV95-Hauptpunkte (LV95-HP) bezeichnet. Für eine wirtschaftliche Nutzung des neuen Bezugsrahmens ist nach heutigen Erkenntnissen noch eine Verdichtung mit sogenannten LV95-Verdichtungspunkten (LV95-VP) erforderlich. Zu einer klaren Verständigung soll künftig die Bezeichnung LV95-Punkt als Oberbegriff für die Punkte des eigentlichen GPS-Landesnetzes (LV95-HP und LV95-VP) und nicht für beliebige Punkte, deren Koordinaten im Bezugsrahmen LV95 bekannt sind, verwendet werden.

Die LV95-Punkte sind Punkte der Landesvermessung. Damit liegen Erstellung und Unterhalt dieser Punkte in der Zuständigkeit der L+T. Bei den in den nächsten Jahren zu erstellenden Verdichtungspunkten (LV95-VP) soll die Wahl des

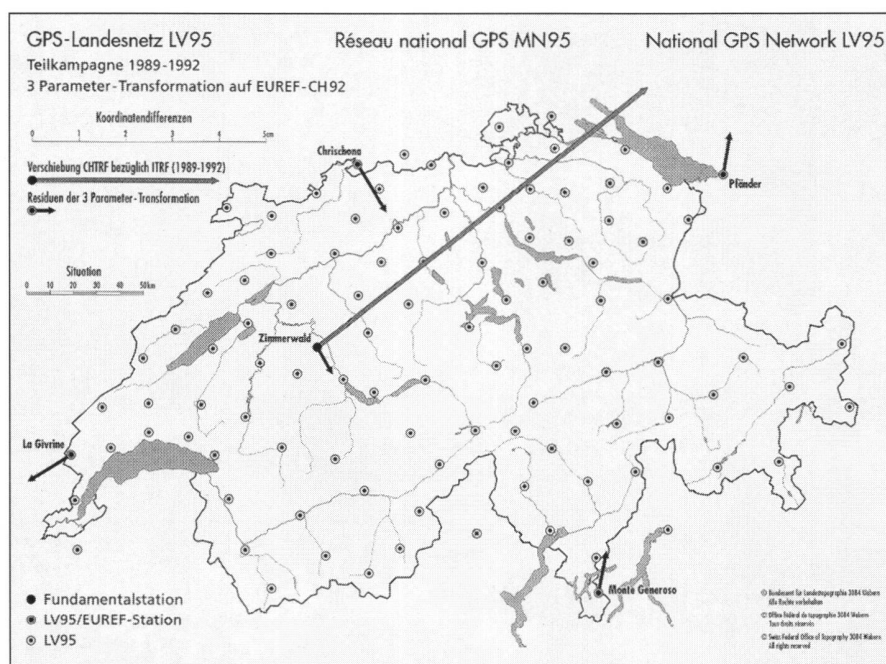


Abb. 12: Graphische Darstellung der Lage-Residuen von Tab. 9.

Standortes jedoch in Absprache mit den kantonalen Vermessungsbehörden und allfälligen weiteren Benützern nach deren Bedürfnissen erfolgen.

Grundsätze

Die Erstellung der Verdichtungspunkte soll zeitlich und örtlich nach Bedarf erfolgen. Dies bedeutet insbesondere, dass nicht eine systematische, homogene Verdichtung vorgesehen ist. Die Benützer von LV95 sind daher gebeten, ihre Bedürfnisse der L+T rechtzeitig mitzuteilen, damit diese die notwendigen personellen und finanziellen Mittel rechtzeitig bereitstellen kann.

Die Anforderungen an die Punktdichte wird u.a. auch durch den jeweiligen Stand der Technik mitbestimmt, weshalb nicht ausgeschlossen ist, dass sich diese im Verlauf der Zeit ändern könnte. Momentan wird von ca. 100 LV95-VP ausgegangen, womit in den meisten Orten der Schweiz (zumindest im Mittelland) innerhalb von 10 km bis max. 15 km an einen LV95-Punkt angeschlossen werden könnte.

Standort / Kennzeichnung

Für die Verdichtungspunkte gelten bezüglich Sicherheit, Stabilität, Satellitenempfang und Zugänglichkeit die gleichen Anforderungen wie für die Hauptpunkte (siehe Kap. 6). Die Wünsche der Benützer sollen soweit berücksichtigt werden, als sie den erwähnten Anforderungen nicht widersprechen.

Die Verdichtungspunkte sind wie die Hauptpunkte mit einem Kappenbolzen in anstehendem Fels oder in einem Betonsockel zu versichern. Im Gegensatz zu den Hauptpunkten wird jedoch auf eine exzentrische Rückversicherung verzichtet, mit der Begründung, dass eine Neubestimmung des Punktes über die

benachbarten LV95-Punkte wirtschaftlicher ist, als eine aufwendige Einmessung der exzentrischen Zeichen.

Messung, Berechnung, Dokumentation

Bei der Messung sind ausschliesslich Zweifrequenzen-Empfängern einzusetzen, deren Daten mit der Berner GPS Software streng nach der Methode der kleinsten Quadrate (im System CHTRS95) auszuwerten sind. Die Resultate werden anschliessend in den Bezugsrahmen LV95 (CH1903+) transformiert. Die Berechnungen bleiben der L+T vorbehalten. Die Verdichtungspunkte werden genau gleich wie die Hauptpunkte mit einem 2-seitigen Punktprotokoll (A4) dokumentiert (siehe Abb.10). Dazu gehört auch die Bestimmung von lokalen Gebrauchskordinaten im LV03-Rahmen, welche aus den benachbarten LFP2 abgeleitet werden.

b) Bezug zur Landesvermessung LV03 und zur Amtlichen Vermessung

Die Einführung der neuen Landesvermessung bedingt, dass noch während längerer Zeit in beiden Bezugsrahmen LV03 und LV95 gearbeitet wird, weshalb für die Umrechnung geeignete Transformationsverfahren zur Verfügung gestellt werden müssen.

Eine wichtige Vorbereitungsarbeit für die Verbindung des GPS-Netzes mit der Triangulation 1. und 2. Ordnung stellt die Diagnoseausgleichung dar (siehe Kap. 2). Indem die im Rahmen von LV95 angeschlossenen Triangulationspunkte (siehe Kap. 6) als Lagerungspunkte mit den Koordinaten im Bezugsrahmen LV95 eingeführt wurden, konnten mit den Originalmessungen auch für die übrigen Punkte 1./2. Ordnung LV95-Koordinaten berechnet werden.

Die Koordinatendifferenzen, die von 0.0 m in Bern bis ca. 1.6 m in den äussersten Gebieten der Schweiz variieren, sind in Abb. 13 dargestellt. Die systematische Ausdehnung der Vektoren ist hauptsächlich auf den Massstab zurückzuführen, der in LV03 ca. – 6 ppm beträgt, währenddem die Lösung von LV95 als massstabsfrei betrachtet werden kann.

Die Punkte mit bekannten Koordinaten in beiden Bezugsrahmen bilden die Basis für die Transformation und werden als Transformationsstützpunkte (TSP) bezeichnet. Für einen einheitlichen und geordneten Übergang ist vorerst eine zentrale Verwaltung der TSP unabdingbar. Die Erfahrung wird zeigen, inwieweit diese TSP abgestuft werden müssen, und wie breit die Verwaltung dezentralisiert werden kann.

Die L+T hat im Jahre 1993 dem IGP der ETH Zürich einen Forschungsauftrag zur Untersuchung von geeigneten Algorithmen für den Übergang zwischen LV03 und LV95 erteilt. Dabei haben sich ein auf der Kollokation basierendes Verfahren (Programm VERZER) für die Analyse von lokalen Verzerrungen bei den Ausgangskordinaten und eine affine Transformation über finite Elemente (Programm FINELTRA) für die eigentliche Transformation als geeignet erwiesen. Die Kollokation soll als Hilfsmittel für die optimale Auswahl der TSP dienen und hauptsächlich von den Verifikationsinstanzen eingesetzt werden. An dieser Stelle wird deshalb nicht weiter auf dieses Programm eingegangen, die damit durchgeführte Verzerrungsanalyse der TSP1 (TP 1. und 2. Ordnung) aber kurz beurteilt (siehe Abb. 14). Die affine Transformation über Dreiecksmaschen (Programm FINELTRA) wurde in [Carosio und Plazibat, 1995] detailliert vorgestellt. Diese Transformationsmethode wurde vor allem darum gewählt, weil eine sukzessive lokale Verdichtung der Vermaschung (TSP2) möglich ist, und das gleiche Programm auch für die Bedürfnisse der AV eingesetzt werden kann.

Wie aus den Erläuterungen zur Diagnoseausgleichung ersichtlich ist, wurden für alle TP 1. und 2. Ordnung Koordinaten im Bezugsrahmen LV95 bestimmt, die durch gemeinsame Ausgleichung der Originalmessungen und der Anschlussmessungen im Rahmen des GPS-Netzes entstanden sind. Mit diesen Punkten als TSP wurde nun eine Transformation mit dem Programm VERZER durchgeführt. Die Restklaffungen sind in Abb.14 dargestellt. Grössere Restklaffungen zeigen, dass ein Punkt schlecht in den lokalen Trend passt und demnach als Ausreisser zu betrachten ist. Als Beispiele können die Nachbarpunkte Burst und Gemmenalphorn (nördl. Interlaken BE) oder Forch und Pfannenstiel (Zürichsee) erwähnt werden, bei denen die durch den lokalen Trend nicht

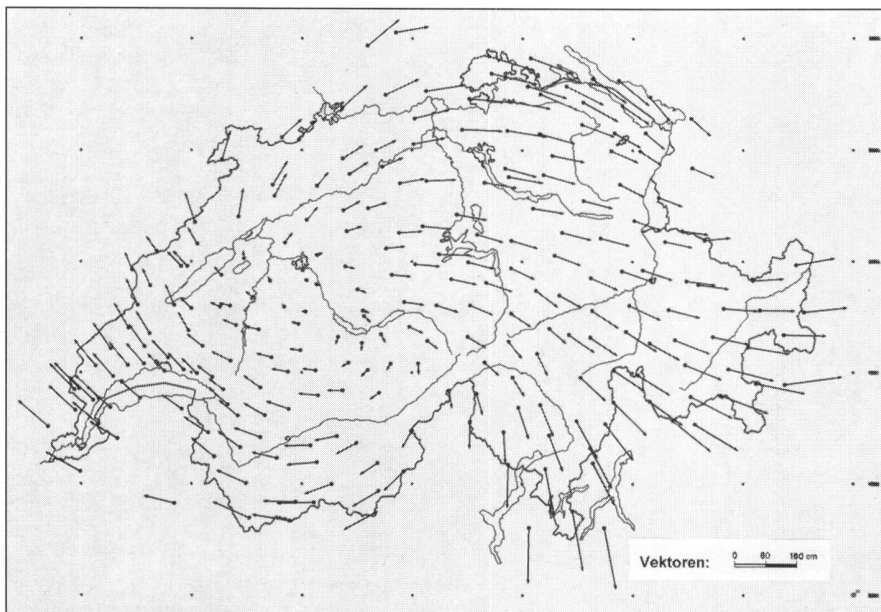


Abb. 13: Koordinatendifferenzen LV03 -> LV95.

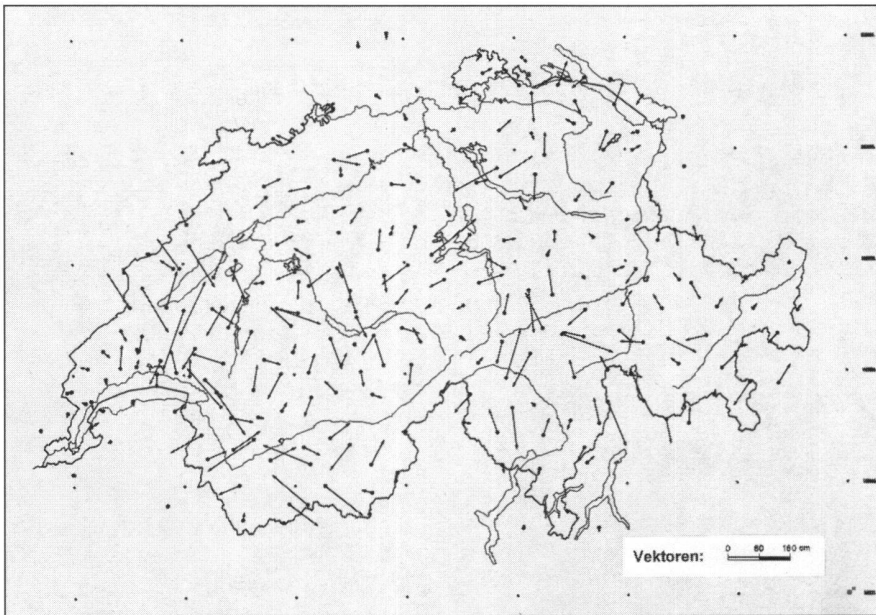


Abb. 14: Restklaffungen der mit VERZER transformierten TP 1. und 2. Ordnung.

erfassten Restklaffungen ca. 8 cm bzw. 10 cm betragen.

Diese lokalen Verzerrungen haben nun zur Folge, dass bei der Transformation mit FINELTRA benachbarte Dreiecksmaschen grössere Verzerrungsdifferenzen aufweisen, was eigentlich unerwünscht ist, weil damit eine Diskontinuität in der Richtung beim Übergang von einer Masche zur anderen entstehen kann. Zurzeit fehlen allerdings noch die Erfahrungen darüber, ab welcher Grösse der Verzerrungsdifferenzen sich dieser Nachteil in der Praxis bemerkbar macht und nicht mehr akzeptiert werden kann. Es gilt nun die aus der Verzerrungsanalyse resultierenden lokalen Verzerrungen zu analysieren und gegebenenfalls die notwendigen Massnahmen vorzusehen. Als Möglichkeiten seien eine verfeinerte Dreiecksvermaschung mit entsprechend kleineren Verzerrungsdifferenzen zwischen benachbarten Dreiecken oder eine Neubestimmung der entsprechenden Punkte im Bezugsrahmen LV03 (mit entsprechender Anpassung der benachbarten LFP) erwähnt. Für die Amtliche Vermessung sind die aus der Nachführung bekannten Zwänge unter den Fixpunkten ebenfalls genau zu analysieren. Darauf basierend sind gezielt Transformationsstützpunkte festzulegen und die Maschenweite entsprechend zu verfeinern.

Testberechnungen mit FINELTRA

Auf der Basis der provisorischen Dreiecksvermaschung mit TSP1 (TP 1./2. Ordnung) wurde eine erste Testberechnung durchgeführt, indem die lokalen Gebrauchskordinaten der LV95-Hauptpunkte transformiert wurden. Diese Gebrauchskordinaten wurden bestimmt durch den Anschluss an die benachbarten LFP2.

Die Koordinatendifferenzen zu den mit dem GPS-Landesnetz bestimmten LV95-Koordinaten betragen im Mittelland weniger als 10 cm (in der Westschweiz mit der revidierten Triangulation 1./2. Ordnung sogar weniger als 5 cm), was in Berücksichtigung der sehr groben Dreiecksvermaschung als sehr gut bezeichnet werden kann. In den Berggebieten treten noch wesentlich grössere Differenzen auf, die hauptsächlich auf die Nichtberücksichtigung der Lotabweichungen bei der Originalbestimmung der LFP2 zurückgeführt werden. In diesen Gebieten müsste zur Erreichung von besseren Resultaten eine verfeinerte Dreiecksvermaschung gewählt werden.

Sofern die verwendeten LFP2 repräsentativ in dem bestehenden Fixpunktnetz integriert sind, können die LV95-Punkte für die AV als zusätzliche TSP verwendet werden. Die Anwendung von FINELTRA in der AV wird z.Z. anhand eines Pilotprojekts im Kanton Zug überprüft. Ähnliche Untersuchungen wurden auch im Rahmen des Diplomvermessungskurses 1994 in Lugano durchgeführt [Tognacca, 1995].

c) Anwendungen in der Ingenieurvermessung

Die bisherige Landesvermessung (LV03: Triangulation 1. bis 3. Ordnung, LN02: Landesnivellement) konnte die Anforderungen der Ingenieurvermessung nur z.T. erfüllen. In vielen Fällen (Tunnelabsteckungen, Deformationsnetze) mussten spezielle Grundlagennetze (Werk-Koordinatenrahmen) erstellt werden. Die Grundlagennetze von LV95 sind so konzipiert, dass sie auch den meisten Anforderungen grosser Ingenieurprojekte dienen. Für Ingenieurvermessungen hoher Genauigkeit sollte der Bezugsrahmen CHTRF95

verwendet werden, der neben hochgenauen Koordinaten auch ein kinematisches und ein stochastisches Modell enthält.

10. Nachführungskonzept

Mit der Schaffung eines solchen, nicht alltäglichen Werkes ist die Arbeit noch längst nicht abgeschlossen, wenn die Resultate und Schlussberichte vorliegen. Es ist wichtig, schon von Beginn weg auch an den zukünftigen Unterhalt und die Nachführung der Punkte und der zugehörigen Dokumentation zu denken. Letzten Endes ist ein mit aller Sorgfalt geschaffenes Werk genau so gut, wie seine Nachführung funktioniert. Deshalb wurde versucht, ein entsprechendes Nachführungskonzept aufzubauen, welches zwar gegenüber der bisherigen Praxis keine grundsätzlichen Neuigkeiten aufweist, im Zusammenhang mit den zusätzlichen Anforderungen der neuen Landesvermessung (z.B. neuer Bezugsrahmen, kinematische Modelle) aber doch einige neue Elemente enthält.

Grundsätze

Beim Gedanken an eine effiziente Nachführung muss man sich der wichtigsten Nachführungsgrundsätze bewusst werden. Dazu gehört in erster Linie eine gute und möglichst klare Organisation, nach welcher die einzelnen Arbeitsschritte und die Kompetenzen geregelt sind, wonach also jeder Beteiligte weiss, welche Funktion ihm zusteht. Dies macht nur Sinn, wenn die Nachführung den aktuellen Stand garantiert, und die Arbeiten effizient und zuverlässig ausgeführt werden. Die Nachführung darf also in keinem Falle unterschätzt werden, denn nur so kann gewährleistet werden, dass die ursprüngliche Qualität auch über Jahre erhalten bleibt.

Die neue Landesvermessung LV95 mit einer überblickbaren Anzahl Punkte über die ganze Schweiz bietet diesbezüglich den Vorteil, dass man sich auf wenige, dafür aber gut gelegene und sichere Punkte beschränken kann.

Art und Umfang der Nachführung

Wie bereits aus der AV93 bekannt ist, wird unterschieden zwischen der laufenden und der periodischen Nachführung. Während mit der laufenden Nachführung aktuellen Meldungen jeglicher Art sofort Rechnung getragen wird, wird daneben auch versucht mit einem Fünf-Jahresrhythmus sämtliche LV95-Punkte periodisch zu begehen. Zusätzlich zu diesen routinemässigen, nach einer Vollständigkeitsliste kontrollierten Unterhaltsarbeiten kommen neu hinzu: die zentrale Verwaltung der Transformationsparameter aus dem Bezug zu bisherigen Vermessungswerken und die Untersuchung der Kinematik, welche sich aus den vorgesehenen

Wiederholungsmessungen auf den LV95-Punkten in einem Rhythmus von ca. zehn Jahren ergeben wird.

Bei all diesen Nachführungsarbeiten gilt es, den Kontakt zu den betroffenen Instanzen (Kantone, Gemeinden, Eigentümer, allg. Benutzer, usw.) intensiv zu pflegen. Ein daraus resultierendes und funktionierendes Meldewesen ist schliesslich die Voraussetzung, um eine sichere Nachführung zu gewährleisten.

Zuständigkeit und Finanzierung

Neben den rein technischen Arbeitsabläufen müssen auch die Zuständigkeiten und die damit verbundene Finanzierung klar geregelt sein. Dabei gilt der Grundsatz, dass die Belange der Landesvermessung in die Zuständigkeit des Bundesamtes für Landestopographie fallen und deren Ergebnisse weiteren Anwendern als Grundlage zur Verfügung steht. Den Aufwand für die Herstellung des Bezuges zu LV95 hat aber jeder Benutzer selbst zu erbringen und zu finanzieren. Damit ist für die Amtliche Vermessung naheliegend, dass die Kosten gemäss bisheriger Praxis unter Bund, Kanton und Auftraggeber aufgeteilt werden.

Anders ausgedrückt bedeutet dies also, dass die L+T für den Unterhalt und die Nachführung sämtlicher LV95-Haupt- und Verdichtungspunkte sowie der Transformationsstützpunkte der Stufe eins (TSP1), welche den Bezug zur bisherigen Landesvermessung LV03 herstellen und eine entsprechende Verzerrungsanalyse erlauben, aufzukommen hat. In den gleichen Zuständigkeitsbereich fallen die Verwaltung der Transformationsparameter (Stufe Landesvermessung) und die kinematischen Modelle. Selbstverständlich bleiben die bisherigen LFP1 im Bezugsrahmen LV03 in der Verantwortung der L+T, solange offiziell im Bezugsrahmen LV03 gearbeitet wird. Sollte in den nächsten Jahren ein Übergang der Amtlichen Vermessung zum Bezugsrahmen LV95 verwirklicht werden, verlieren diese LFP1 zunehmend an Bedeutung, was auch den Unterhalt durch die L+T entlasten wird.

Die ganze Problematik des Überganges der Amtlichen Vermessung auf LV95 wird durch eine paritätische Arbeitsgruppe bearbeitet [Ammann et al., 1996], der betreffende Bericht ist unterdessen in Vernehmlassung. Damit ist die effektive Kostenverteilung noch nicht definitiv geregelt. Es zeichnet sich aber ab, dass der Kostenverteiler analog der bisherigen Praxis bei den LFP2 gehandhabt wird. Die wirtschaftlichste Lösung bei einem allfälligen Übergang von LV03 zu LV95 wird sich ergeben, indem laufend mit der Aufarbeitung der Amtlichen Vermessung auf AV93 (Erneuerungen oder Revisionen der Ebene Fixpunkte) grössere Gebiete bereits an die nächstgelegenen LV95-Punkte angeschlossen werden, und in dieser Arbeits-

Schritt	Abschluss Jahr	Arbeiten	Beteiligte Institute
1	1995/96	Ausbau Geostation Zimmerwald (Neues Teleskop, Laserdistanzmesser, Ausbau Permanentstation GPS, Anschluss an LN)	L+T, AIUB, IGP
2	1996	Gesamtausgleichung DIA95 (GPS-Netz + Diagnosenetz DIA93)	L+T
3	1996	Zentimeter-Geoidmodell	IGP, L+T
4	ab 1996	Verdichtung von LV95 (Priorität nach Bedarf AV etc.)	L+T, V+D
5	ab 1997	Wiederholungsmessungen im GPS-Netz LV95	L+T
6	ca. 2001	Kinematische Neuausgleichung des Landesnivellements LN95	L+T, IGP
7	ca. 2001	Kinematisches 3D-Modell für LV95	L+T

Tab. 10: Weiteres Vorgehen im Projekt LV95.

phase die geeigneten Transformationsstützpunkte der Stufe zwei (TSP2) festgelegt werden. Natürlich muss dieser Schritt in sehr enger Koordination zwischen den betroffenen Instanzen (L+T / V+D / Kantone / Unternehmer) unternommen werden.

11. Ausblick und Dank

Das Projekt LV95 umfasst nicht nur den Aufbau und die einmalige Messung eines GPS-Landesnetzes. Wie bereits erwähnt, enthält das Konzept eine ganze Reihe zusätzlicher Arbeiten, welche erst nach 1995 abgeschlossen werden können. In Tab.10 sind die wichtigsten geodätischen Folgearbeiten des Projekts LV95 nach 1995 zusammengestellt.

Wie dieser Bericht zeigt, scheint es gelungen zu sein, mit der Landesvermessung 95 eine tragfähige Grundlage für alle heute denkbaren Bedürfnisse der Vermessung bereitzustellen. Auch das Ziel, die neuen Grundlagen so rechtzeitig bereitzustellen, dass auf Provisorien weitgehend verzichtet werden kann, scheint erreichbar. Damit sollten die Voraussetzungen gegeben sein, dass die neuen geodätischen Grundlagen wieder für mehrere Jahrzehnte (fast) allen Anforderungen genügen sollten.

Abschliessend gebührt allen Beteiligten für die Unterstützung des Projektes Dank: Zuerst und ganz besonders den Mitarbeitern der Abteilung Geodäsie der L+T, die es mit einem vorbildlichen Einsatz ermöglicht haben, die hoch gesteckten Ziele von LV95 zu erreichen. Der Schweizerischen Geodätischen Kommission (SGK), insbesondere den Mitgliedern der Arbeitsgruppe GPS ist für die wertvollen Impulse zu danken, die in der Anfangsphase dazu beitrugen, die neue Technologie zu beherrschen. Das Team am Astronomischen Institut der Universität Bern (AIUB) unter der Leitung von Prof. G. Beutler verdient den besonderen Dank für die weltbekannte «Berner GPS-Software», dem optimalen Auswerteprogramm für

diesen Zweck. Den Mitarbeitern des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie der ETHZ, die im Zusammenhang mit LV95 in mehreren Forschungsprojekten gewirkt haben, ist für ihre wertvollen Beiträge zu danken, namentlich Prof. A. Carosio, Prof. H.-G. Kahle, Dr. A. Geiger und Dr. B. Wirth. Einen besonderen Dank verdient Dr. W. Gurtner vom AIUB, der im Ausschuss Referenzsysteme mitgewirkt und massgeblich zum guten Gelingen dieses Teils beigetragen hat. Den Partnern vom Landesverwaltungsamt Niedersachsen, Hannover (D), und vom Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen, Wien (A), ist für die ausgezeichnete Zusammenarbeit bei der gegenseitigen Ausleihe von GPS-Empfängern und teilweise auch Personal zu danken, sowie der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt für die Daten des automatischen Meteoronetzes, die für die korrekte Meteoromodellierung gute Dienste leisteten.

Literatur/Abkürzungen:

Literaturliste und Abkürzungsverzeichnis können bei den Autoren bezogen werden.

Adresse der Verfasser:

E. Gubler, D. Gutknecht, U. Marti, Dr. D. Schneider, Th. Signer, B. Vogel, A. Wiget
Bundesamt für Landestopographie
Seftigenstrasse 264
CH-3084 Wabern