

Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz

(Fortsetzung der Publikationsreihe
«Astronomisch-geodätische Arbeiten in der Schweiz»)

herausgegeben von der

Schweizerischen Geodätischen Kommission

(Organ der Schweizerischen Akademie der Naturwissenschaften)

Neununddreissigster Band

125 Jahre Schweizerische Geodätische Kommission

- I. Bedeutung geodätischer Raumverfahren für
Landesvermessung und Geodynamik**
von Rudolf Sigl, München
- II. Beitrag der Geodäsie zur Geodynamik**
von Hans-Gert Kahle
- III. L'état actuel de la recherche
sur les mouvements de l'écorce terrestre
en Suisse**
par Francis Jeanrichard
- IV. Die Satellitengeodäsie im Dienste
der globalen Geodynamik**
von Ivo Bauersima
- V. Die Veranstaltungen zum
125-Jahr-Jubiläum der Schweizerischen
Geodätischen Kommission**
von Werner Fischer

1989

Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz

(Fortsetzung der Publikationsreihe
«Astronomisch-geodätische Arbeiten in der Schweiz»)

herausgegeben von der

Schweizerischen Geodätischen Kommission

(Organ der Schweizerischen Akademie der Naturwissenschaften)

Neununddreissigster Band

125 Jahre Schweizerische Geodätische Kommission

- I. Bedeutung geodätischer Raumverfahren für
Landesvermessung und Geodynamik**
von Rudolf Sigl, München
- II. Beitrag der Geodäsie zur Geodynamik**
von Hans-Gert Kahle
- III. L'état actuel de la recherche
sur les mouvements de l'écorce terrestre
en Suisse**
par Francis Jeanrichard
- IV. Die Satellitengeodäsie im Dienste
der globalen Geodynamik**
von Ivo Bauersima
- V. Die Veranstaltungen zum
125-Jahr-Jubiläum der Schweizerischen
Geodätischen Kommission**
von Werner Fischer

1989

Adresse der Schweizerischen Geodätischen Kommission:

Institut für Geodäsie und Photogrammetrie
Eidg. Technische Hochschule Zürich
ETH-Hönggerberg
CH-8093 Zürich

Adressen der Autoren:

PD Dr. Ivo Bauersima
Astronomisches Institut
Universität Bern
Sidlerstrasse 5
CH-3012 Bern

Werner Fischer, Dipl. Ing.
Institut für Geodäsie und Photogrammetrie
Eidg. Technische Hochschule
ETH-Hönggerberg
CH-8093 Zürich

Direktor Francis Jeanrichard, Dipl. Ing.
Bundesamt für Landestopographie
Seftigenstrasse 264
CH-3084 Wabern

Prof. Dr. Hans-Gert Kahle
Institut für Geodäsie und Photogrammetrie
Eidg. Technische Hochschule
ETH-Hönggerberg
CH-8093 Zürich

o. Prof. Dr.-Ing. Rudolf Sigl
Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie
Technische Universität München
Arcisstrasse 21
D-8000 München 2

Redaktion des 39. Bandes:

Werner Fischer, Dipl. Ing.

Satz: Fotosatz Schad + Frey AG, CH-3018 Bern

Druck: Offsetdruck Bern AG, CH-3018 Bern

Vorwort

Mit der Bedeutung des 125jährigen Bestehens der Schweizerischen Geodätischen Kommission (SGK) wird zugleich auch die Rolle der Geodäsie als Ganzes angesprochen, deren Historie bis weit ins ägyptische Altertum zurückgeht. Geodäsie heisst, aus dem Griechischen wörtlich übersetzt, Erdteilung (Geo = Erde, daein = teilen). Dieser Begriff rührt davon her, dass man im ägyptischen Altertum nach Nilüberschwemmungen die Bewässerungsanlagen und Schwemmfelder immer wieder neu ausmessen und *einteilen* musste. Heute legt man als Aufgabe der modernen Geodäsie die Erforschung *der Grösse, der Figur, der Bewegung und des Schwerfeldes* der Gesamterde zugrunde. Es ist daher gedanklich auch eine Frage des Massstabes, von der im Altertum praktizierten *örtlichen Landmessung*, über die in den letzten 100 Jahren vom Bundesamt für Landestopographie durchgeführte *regionale Landesvermessung* zur zukünftigen *globalen Erdvermessung* zu gelangen.

Eine der ersten umfassenden wissenschaftlichen Unternehmungen, *die Grösse und Figur* der Erde zu bestimmen, geht etwa 250 Jahre zurück, als die französische Akademie der Wissenschaften zwei Expeditionen aussandte, eine erste nach Lappland in die Nordhemisphäre und eine zweite nach Ecuador in die Äquatorregion, um die *Ellipsoidform* der Erde zu ermitteln. Im Verlauf der Messungen am Fuss der Anden sowie später in der Ganges-Ebene am Fusse des Himalaya (1850) war als Nebenergebnis die überraschende Entdeckung gemacht worden, dass die Massen des Andengebirges und des Himalayamassivs das örtliche Lot nur um wenige Bogensekunden, statt um eine Bogenminute ablenkte.

Es erhob sich die Frage,

- ob das Newton'sche Gravitationsgesetz nicht stimmte
- oder ob im Innern der Gebirge oder darunter verborgene Defizitmassen lägen, die die Gravitationswirkung der sichtbaren Gebirgsmassen weitgehend kompensierten.

Diese Fragen waren auch noch sehr aktuell, als vor 125 Jahren die SGK gegründet wurde: Generalleutnant Baeyer war im Auftrag seiner Regierung (König Wilhelm I) beim Schweizerischen Bundesrat vorstellig geworden, mit der Anfrage, ob sich die Schweiz an einer mitteleuropäischen Messkampagne beteiligen würde, um die Triangulationsketten nördlich und südlich der Alpen miteinander zu verbinden und dabei insbesondere den Einfluss der Alpenkette auf die Lotrichtungen zu erforschen. Der Bundesrat beauftragte daraufhin die Schweizerische Naturforschende Gesellschaft (SNG), eine entsprechende Kommission einzusetzen. Unter der massgeblichen Mitwirkung von General Dufour entstand so die SGK. Ausser der Schweiz waren als erste Staaten damals auch noch die Länder Schweden, Norwegen, Polen, Italien, Österreich, Sachsen und Preussen vertreten. Später kamen fast alle europäischen Staaten hinzu.

Die ersten 100 Jahre der SGK sind in der Festschrift zur 100-Jahr-Feier beschrieben worden. Die letzten 25 Jahre hat M. Schürer (1986) im Sonderheft «125 Jahre Schweizerische Geodätische Kommission» (Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik, 8/86) zusammengefasst. Über den augenblicklichen Stand und die zukünftige Entwicklung gibt der Aufsatz von H.-G. Kahle (in diesem Band) Auskunft.

Während man bis in die 50er Jahre von einem zeitlich konstanten Erdmodell und einem konstanten Schwerfeld ausgehen konnte, wurde in den letzten 25 Jahren in verblüffendem Ausmass deutlich, dass sich die oberen Schichten der Erde in der geologischen Vergangenheit in gigantischen Bewegungen (bis zu mehreren 1000 km) relativ zueinander verschoben haben müssen und sich auch nach wie vor im Verlauf von globalen tektonischen Prozessen verschieben. Der Vermessung dieser Verschiebungen, die mit energiereichen Erdbeben und verheerenden Vulkaneruptionen einhergehen, ist eine der Hauptaufgaben der modernen Geodäsie-Forschung (vgl. Sigl, in diesem Band). Damit rastet die Geodäsie in eine weltweite Neuentwicklung der Erdforschung ein, die sich mit aktuellen tektonischen Problemen, wie z.B. der Erdbebenvorhersage und der Erfassung von rezenten Erdkrustenbewegungen beschäftigt.

Eingeleitet wurde diese Entwicklung durch neue Erkenntnisse der Erdwissenschaftler in den letzten 25 Jahren, wonach die Erdoberfläche aus mehreren durchschnittlich etwa 100 km dicken Lithosphärenplatten besteht, die sich gegeneinander, auseinander oder aneinander vorbei bewegen. Dies führt zur Ausbildung von Tiefseegräben, kontinentalen und ozeanischen Riftsystemen sowie zur Auffaltung von tertiären Faltengebirgen, wie der Himalaya, die Anden oder die Alpen. Mit diesen grossräumigen Prozessen sind Erdbeben und Vulkanausbrüche verbunden, siehe z.B. Mexico, Friaul, Mt. St. Helens oder Nevado del Ruiz. Es ist von grosser Bedeutung, die grossräumigen Bewegungen der Lithosphärenplatten hinsichtlich ihrer Richtung und Geschwindigkeit möglichst kontinuierlich zu verfolgen, um Informationen über zukünftige Erdbeben oder Vulkanausbrüche zu erhalten.

Es ist klar, dass man für die Vermessung von so grossräumigen Verschiebungen nicht mehr die örtliche Kirchturmspitze oder die nächsten Bergkuppen als Triangulations-Visurziele verwenden kann, sondern Ziele braucht, die über die Lithosphärenplatten hinweg, von Kontinent zu Kontinent *sichtbar* sind. Es ist daher naheliegend, Satelliten zu benutzen. Die NASA hat zu diesem Zweck einen mit Reflektoren ausgestatteten Satelliten, LAGEOS, vor 10 Jahren in eine etwa 6000 km hohe Umlaufbahn gebracht.

In der Schweiz wird dieser Satellit von der Satelliten-Beobachtungsstation Zimmerwald verfolgt. Die Berner Universi-

tät verfügt über ein *stationäres* Laserteleskop, das von der SGK mitfinanziert, sich an internationalen Messkampagnen operationell beteiligt (vgl. Bauersima, in diesem Band). Zusätzlich kommen *mobile* Laserteleskope zum Einsatz, wie z.B. im Herbst 1985 auf dem Monte Generoso, als wir die Basislinie Monte Generoso–Jungfrauoch–Zimmerwald zum ersten Mal satellitengeodätisch bestimmten, um später mit Wiederholungsmessungen die zu erwartenden Krustenverkürzungen zwischen dem Schweizer Mittelland und dem Tessin zu erfassen.

Die Schweiz befindet sich nach wie vor im Spannungsfeld zwischen der Eurasischen Lithosphärenplatte im Norden und dem Adriatischen Sporn der Afrikanischen Lithosphärenplatte im Süden. Dies führt zu horizontalen und vertikalen Krustenverschiebungen im Alpenbereich, die auch heute noch ablaufen, wie die wiederholten Präzisionsnivellements des Bundesamtes für Landestopographie eindrücklich belegen. Danach heben sich Stationen im Rhonetal (Brig/Visp) und im Vorderrheintal um bis zu 1,8 mm/Jahr – verglichen mit Stationen im Mittelland (vgl. Jeanrichard, in diesem Band).

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die SGK in Zukunft verstärkt die *nationale Koordination* für die Erforschung der *Geodynamik der Schweizer Alpen* fördern wird und dabei insbesondere ihre nun seit 125 Jahren praktizierte Funktion der *internationalen Zusammenarbeit* weiter ausbauen will, um landes- und alpenübergreifende geodätische Basislinien zu etablieren.

Die Rolle der Geodäsie im Spektrum der geodynamischen Forschung wird von unserem Gastreferenten, Herrn Kollegen Prof. Dr. R. Sigl, eindrücklich beschrieben.

Im Namen der SGK danken wir allen Beteiligten, die sich aktiv an den Jubiläumsfeierlichkeiten beteiligt haben. In erster Linie gilt unser Dank den Referenten an der Festveranstaltung und den Autoren dieses Bandes. Namentlich sei auch Dr. R. Guggenbühl, Pressechef der ETH Zürich, für seine unschätzbaren Dienste gedankt, ebenso Frau S. Schönherr und Frau J. Bartholomew für ihren grossen Einsatz. Ein herzlicher Dank gilt sodann allen Mitarbeitern, die zum guten Gelingen der beiden Exkursionen beigetragen haben (vgl. Fischer, in diesem Band, 5. Danksagungen).

Schliesslich ist es unsere angenehme Pflicht, der Schweizerischen Akademie der Naturwissenschaften für die Übernahme der Druckkosten zu danken, womit die Herausgabe dieses «Jubiläumsbandes» ermöglicht wurde.

Im Namen der
Schweizerischen Geodätischen Kommission

Direktor F. Jeanrichard,
Vizepräsident der SGK

Prof. Dr. H.-G. Kahle,
Präsident der SGK

Avant-propos

Les 125 années d'existence de la Commission géodésique suisse (CGS) font ressortir le rôle de la géodésie comme telle, dont l'histoire remonte loin dans l'antiquité égyptienne. Géodésie signifie, traduit littéralement du grec, division de la terre (geo = terre, daein = diviser). Cette notion provient du fait que dans l'antiquité égyptienne, les systèmes d'irrigation et les champs inondés devaient être remesurés et *repartagés* après chaque inondation du Nil. Aujourd'hui, la géodésie moderne a comme objet la recherche *des dimensions, de la forme, du mouvement et du champ de gravité* du globe terrestre. On peut considérer cette évolution comme une question d'échelle: de la *mensuration locale* de l'antiquité on est passé, il y a cent ans, à la *mensuration nationale* de l'Office fédéral de topographie pour aboutir à la *mensuration globale future de la terre*.

L'une des entreprises scientifiques les plus importantes, déterminer *la forme et les dimensions* de la terre, remonte à environ 250 ans lorsque l'Académie française des sciences envoya deux expéditions, l'une en Laponie dans l'hémisphère nord et l'autre en Equateur dans la région équatoriale pour déterminer la *forme ellipsoïdale* de la terre. Au cours de mesures au pied des Andes, ainsi que plus tard dans la plaine du Gange au pied de l'Himalaya (1850), on fit la découverte surprenante que les masses du massif andin et du massif himalayien ne déviaient la verticale locale que de quelques secondes d'arc au lieu de la minute attendue.

Les questions suivantes se posaient:

- La loi de la gravitation de Newton est-elle fautive?
- Y a-t-il à l'intérieur des massifs montagneux des déficits de masse ignorés qui compensent largement les effets de gravité des massifs apparents?

Ces questions étaient encore très actuelles lorsque, il y a 125 ans, la Commission géodésique suisse fut fondée. Le Lieutenant-général Baeyer, mandaté par son gouvernement (le roi Wilhelm 1^{er}), demandait au Conseil fédéral si la Suisse était disposée à participer à une campagne de mesure européenne pour relier entre elles les chaînes de triangulation du nord et du sud des Alpes, ceci en particulier pour étudier l'influence de la chaîne alpine sur la direction des verticales. Le Conseil fédéral chargeait alors la Société helvétique des sciences naturelles (SHSN) de mettre sur pied une commission adéquate. Sous l'impulsion déterminante du général Dufour naissait ainsi la CGS. En plus de la Suisse, les pays tels que la Suède, la Norvège, la Pologne, l'Italie, l'Autriche, la Saxe et la Prusse étaient représentés. Plus tard, presque tous les états européens se sont joints à l'entreprise.

Les 100 premières années de la CGS sont décrites dans le fascicule de fête du 100^e anniversaire. M. Schürer a récapitulé les 25 dernières années dans le numéro spécial «125 Jahre Schweizerische Geodätische Kommission» de la revue Men-

suration, Photogrammétrie, Génie rural, 8/86. L'exposé de H.-G. Kahle (dans ce volume) donne l'état actuel et les développements futurs.

Alors que jusque vers 1950 on pouvait considérer le modèle terrestre et le champ de gravité comme constants dans le temps, il est apparu d'une manière tout à fait spectaculaire au cours des 25 dernières années que les couches supérieures de la terre ont dû subir des mouvements gigantesques (jusqu'à plusieurs milliers de km) durant le passé géologique et qu'elles continuent de se déplacer au cours de processus tectoniques globaux. La mesure de ces déplacements, liés à des tremblements de terre riches en énergie ou à des éruptions volcaniques dévastatrices, est l'un des objectifs principaux de la recherche géodésique moderne (voir Sigl, dans ce volume). La géodésie entre ainsi dans une ère nouvelle de développement à l'échelle mondiale, s'occupant de problèmes tectoniques actuels tels que, par exemple, la prévision des tremblements de terre et la détermination des mouvements récents de la croûte terrestre.

Ce développement a commencé par la découverte, au cours des 25 dernières années, du fait que la surface de la terre est formée de plusieurs plaques lithosphériques d'une épaisseur moyenne d'environ 100 km, plaques qui se rapprochent, s'éloignent ou se chevauchent l'une l'autre. Cela conduit à la formation de fosses marines, de fossés tectoniques continentaux ou océaniques ou aux plissements montagneux du tertiaire, comme l'Himalaya, les Andes ou les Alpes. Ces processus à l'échelle planétaire causent des tremblements de terre ou des éruptions volcaniques, comme par exemple à Mexico, au Frioul, au Mount St. Helens ou encore à Nevado del Ruiz. Il est très important de pouvoir suivre, autant que possible continuellement, ces vastes mouvements des plaques lithosphériques dans leur direction et leur vitesse afin d'obtenir des informations sur les futurs tremblements de terre ou éruptions volcaniques.

Il est évident que pour mesurer des déplacements aussi vastes, la visée par triangulation de clochers locaux ou de sommets de montagne voisins ne suffit plus, mais des cibles *visibles* de continent à continent par-dessus les plaques lithosphériques sont nécessaires. C'est pourquoi l'utilisation des satellites s'impose. A cet effet la NASA a mis sur orbite à une altitude d'environ 6000 km, il y a près de 10 ans, le satellite LAGEOS équipé de réflecteurs.

En Suisse, ce satellite est suivi par la station d'observation des satellites de Zimmerwald. L'Université de Berne y dispose d'un télescope à laser *stationnaire*, en partie financé par la CGS, et prend une part active aux campagnes internationales de mesure (voir Bauersima, dans ce volume). En plus, des télescopes à laser *mobiles* sont utilisés, comme par exemple

en automne 1985 sur le Monte Generoso lorsque nous avons mesuré pour la première fois par satellite la base Monte Generoso–Jungfrauoch–Zimmerwald afin de pouvoir déterminer plus tard par répétition des mesures le rétrécissement de la croûte terrestre entre le Plateau suisse et le Tessin.

La Suisse se trouve toujours dans un champ de tension entre la plaque lithosphérique eurasienne au nord et l'éperon adriatique de la plaque africaine au sud. Ceci a pour effet des mouvements horizontaux et verticaux de la croûte dans la zone alpine, mouvements encore actuels comme les répétitions du nivellement de précision de l'Office fédéral de topographie l'ont bien montré. On constate ainsi que des repères situés dans la vallée du Rhône (Brigue/Viège) et dans la vallée du Rhin antérieur subissent une surrection jusqu'à 1,8 mm/an par rapport aux repères du Plateau (voir Jeanrichard, dans ce volume).

En résumé on peut dire que la CGS aura à accentuer son rôle de *coordination nationale* pour l'étude de la *géodynamique des Alpes suisses* et par-là même sera appelée à élargir sa fonction de *coopération internationale* pour établir des bases géodésiques surpranationales et transalpines afin de promouvoir la recherche en vue de la prévision des tremblements de terre.

Le rôle de la géodésie dans le domaine de la recherche géodynamique est décrit de manière magistrale par le conférencier invité, notre collègue le professeur R. Sigl.

Au nom de la CGS, nous remercions toutes les personnes qui ont contribué activement à la réussite des manifestations marquant cet anniversaire. Nos remerciements s'adressent en premier lieu aux conférenciers de la journée commémorative ainsi qu'aux auteurs de ce volume. Nous adressons également nos remerciements les plus chaleureux à M. R. Guggenbühl, Chef du Service de presse de l'EPF de Zurich et à Mmes S. Schönherr et J. Bartholomew pour leur engagement sans réserve. En outre, que tous les collaborateurs qui ont contribué à la réussite des deux excursions (voir Fischer, dans ce volume) trouvent ici l'expression de notre vive reconnaissance.

Enfin, nous avons l'agréable devoir d'exprimer notre gratitude à l'Académie suisse des sciences naturelles pour le financement de l'impression de ce volume.

Au nom de la
Commission géodésique suisse

F. Jeanrichard, directeur,
Vice-président de la CGS

Prof. H.-G. Kahle,
Président de la CGS

Inhalt

I.	Bedeutung geodätischer Raumverfahren für Landesvermessung und Geodynamik	
	von Rudolf Sigl, München	1
1.	Aufgabe der Geodäsie heute	1
2.	Überblick über die geodätischen Raumverfahren	2
3.	Einsatz geodätischer Raumverfahren in der Landesvermessung und Geodynamik	8
4.	Auswirkungen auf das Berufsbild und die Ausbildung der Vermessungsingenieure	16
5.	Ausblick	17
	Literatur	18
II.	Beitrag der Geodäsie zur Geodynamik	
	von Hans-Gert Kahle	19
1.	Einleitung	19
2.	«High-Technology»-Anwendungen der SGK	21
3.	Die SGK im Rahmen der globalen Geodynamik	21
4.	Zielgrößen der Geodäsie	23
5.	Geförderte Arbeiten der SGK	25
6.	Laufende Forschungsprojekte der SGK	26
7.	Ausblick	28
8.	Ausgewählte Referenzen von Arbeiten, die im Rahmen der SGK ausgeführt worden sind	28
	Abkürzungen	29
III.	L'état actuel de la recherche sur les mouvements de l'écorce terrestre en Suisse	
	par Francis Jeanrichard	31
1.	Introduction	31
2.	L'étude des mouvements locaux	31
3.	Résultats de la comparaison de nivellements fédéraux	34
	Bibliographie	36
IV.	Die Satellitengeodäsie im Dienste der globalen Geodynamik	
	von Ivo Bauersima	37
1.	Eine geodätische Aufgabe	37
2.	Das erdfeste Bezugssystem	37
3.	«Geometrische» Satellitengeodäsie	39
4.	Satellitengeodäsie und das inertielle Bezugssystem	41
5.	Die globale Geodynamik	48
	Literatur	48
V.	Die Veranstaltungen zum 125-Jahr-Jubiläum der Schweizerischen Geodätischen Kommission	
	von Werner Fischer	49
1.	Die Vorbereitungen	49
2.	Das Programm vom Freitag, 12. September 1986	52
3.	Die Exkursionen vom Samstag, 13. September 1986	57
4.	Die Öffentlichkeitsarbeit	59
5.	Danksagungen	61

Bedeutung geodätischer Raumverfahren für Landesvermessung und Geodynamik*

von Rudolf Sigl, München

Hochgeehrte Festgäste,

zunächst möchte ich den Herren Kollegen für die ehrenvolle Einladung zu diesem Festvortrag und Herrn Kahle für die freundliche Einführung herzlich danken.

Der Teil «Grussadressen» des Festprogrammes ist vorbei. Trotzdem beginne ich meinen Vortrag mit einem Glückwunsch an die beiden Jubilare: die 125 Jahre alte Schweizerische Geodätische Kommission und die 100jährige Abteilung für Kulturtechnik und Vermessung. Beide Institutionen haben – ich kann den Würdigungen meiner Vorredner kaum noch etwas anfügen – die Entwicklung unserer Disziplin in Wissenschaft und Praxis entscheidend mitgestaltet. Die Veröffentlichungen der Kommission und des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie legen dazu ein beredtes Zeugnis ab.

Hervorragende Fachgelehrte, wie C. F. Baeschlin, Th. Niethammer und F. Kobold, um wenigstens einige Namen zu nennen, haben die Schweizer Geodäsie zu grossem Ansehen geführt. Auch ich verdanke der Schweizer Schule sehr viele Anregungen. Ich wünsche beiden Jubilaren ein weiterhin so erfolgreiches Wirken in Lehre und Forschung!

Meine sehr verehrten Damen und Herren, die Arbeitsweise der Geodäsie hat sich in den letzten 25 Jahren erstaunlich verändert: Neue Methoden und Technologien haben wichtige Ergebnisse gebracht, aber auch zu neuen Fragestellungen geführt. Studien und Projekte lassen vermuten, dass auch in der Zukunft eine rasche Entwicklung zu erwarten ist.

Die Frage, wohin entwickelt sich die Geodäsie, beschäftigt uns sehr, ja, manchmal ängstigt sie uns sogar. Eine Bestandaufnahme und Orientierung ist daher dringend erforderlich. «Quo vadimus?» ist der Titel eines interdisziplinären Symposiums, das 1987 bei der Generalversammlung der Internationalen Union für Geodäsie und Geophysik (IUGG) in Vancouver stattfinden wird. – Wenn ich heute über die «Bedeutung geodätischer Raumverfahren für Landesvermessung und Geodynamik» spreche, so kann ich nur Teilaspekte eines überaus komplexen Entwicklungsprozesses ansprechen.

Anlässlich der 100-Jahr-Feier der SGK im Jahre 1961 hat F. Kobold in einem Ausblick die künftigen Arbeiten der Kommission umrissen und darauf hingewiesen, dass die Geodäsie durch Satellitenbeobachtungen in hohem Masse gefördert werden dürfte [20], [21]. Freilich bestanden damals noch Zweifel, ob sich auch kleine Länder an dieser Entwicklung beteiligen sollten. – Heute haben die geodätischen Raumverfahren einen Stand erreicht, dass sie nicht nur für globale wissenschaftliche Fragestellungen der Erdmessung, sondern auch für praktische Arbeiten, insbesondere für die Landes-

vermessung, zunehmend an Bedeutung gewinnen [36]. Diese Nutzungsmöglichkeiten aufzuzeigen ist heute mein Anliegen.

Ich werde aber nicht nur Erfolge, sondern auch Probleme ansprechen: Die geodätischen Raumverfahren werden langfristig unser Berufsbild verändern und auch neue Anforderungen an die universitäre Ausbildung unserer Ingenieure stellen. Hinzu kommt, dass heute zumindest von Teilen der Gesellschaft der wissenschaftliche, insbesondere der technische Fortschritt mit Skepsis verfolgt wird. Wir müssen also damit rechnen, dass sich die weitere Entwicklung der Geodäsie in einem gewissen Spannungsfeld der Gesellschaft vollziehen wird.

Für meinen Vortrag wähle ich die folgende

Gliederung:

1. Aufgabe der Geodäsie heute;
2. Überblick über die geodätischen Raumverfahren, Ergebnisse;
3. Geodätische Raumverfahren für Landesvermessung und Geodynamik;
4. Auswirkungen auf das Berufsbild und die Ausbildung von Vermessungsingenieuren;
5. Ausblick.

Mit Rücksicht auf die fachwissenschaftlichen Vorträge dieser Festveranstaltung habe ich meinen Vortrag möglichst allgemein verständlich gestaltet, d.h. auf Mathematik und Physik weitgehend verzichtet und versucht, mit Wort und Bild auszukommen. Ich hoffe, meinen Fachkollegen dadurch nicht zum Ärgernis zu werden.

1. Aufgabe der Geodäsie heute

Die Geodäsie hat die Aufgabe, die Erde im Ganzen und im Detail zu bestimmen. Neben dem Erdkörper kommt dabei der Erdoberfläche, auf der wir leben, eine besondere Bedeutung zu. F. R. Helmert hat dies in seiner Definition von 1880, wonach die Geodäsie die Wissenschaft von der Ausmessung und Abbildung der Erdoberfläche ist, treffend formuliert. Nach Auffassung vieler Geodäten ist diese Definition nicht mehr zeitgemäss, weil sie die Bestimmung des Schwerefeldes der Erde nicht explizit enthält. Seit Anfang der 70er Jahre wurde daher die Aufgabe der Geodäsie entsprechend neu formuliert und auch das *Schwerefeld* explizit angesprochen.

Im Grunde ist das Schwerefeld auch in Helmerts Definition enthalten: Man braucht nur den von Helmert 1884 publizierten 2. Band seines Werkes «Die mathematischen und physikalischen Theorien der höheren Geodäsie» anzusehen: Etwa 500 Seiten sind dem Erdschwerefeld gewidmet [16].

* Ausführliche Niederschrift des am 12. September 1986 gehaltenen Festvortrages.

Weit bedeutender ist meines Erachtens, dass die von Modellbildung und Arbeitsweise her lange Zeit als statisches Problem gesehene Aufgabe der Geodäsie heute wegen der hohen Genauigkeit geodätischer Beobachtungen durch eine *dynamische Fragestellung* ersetzt werden muss: Die Erde wird durch Kräfte deformiert, wodurch sich zeitliche Änderungen der Koordinaten von Festpunkten und des Gravitationsfeldes ergeben. Bei allen genauen Messungen ist also die Zeit als vierte Dimension anzugeben, und die bisher als starr angesehene Erde ist mehr und mehr durch ein dynamisches Erdmodell zu ersetzen.

Verständlicherweise empfindet der Praktiker die zeitlichen Änderungen der Erde als lästige Störung: Können doch zu verschiedenen Zeiten ausgeführte Beobachtungen nur unter Berücksichtigung zeitlicher Änderungen miteinander verglichen bzw. gemeinsam verarbeitet werden. Die Genauigkeitssteigerung der Beobachtungen bietet aber den Geodäten eine ungeheure Chance: Wiederholte, zu verschiedenen Epochen ausgeführte Messungen geben Auskunft über das *kinematische Verhalten der Erde*, d. h. wichtige Informationen über das Verhalten des Erdkörpers gegenüber den wirksamen Kräften. Diese auch als *vierdimensionale Geodäsie* bezeichnete Arbeitsweise beeinflusst schon heute die Modellbildung in hohem Masse.

Inzwischen ist auch deutlich geworden, dass sich die Figur- und Feldparameter der Erde konsistent in die Konstanten des Erde-Mond-Systems einfügen müssen, eine Erkenntnis, die bei der Einführung der geodätischen Bezugssysteme von 1967 und 1980 berücksichtigt wurde. Die geodätische Nutzung der Radioastronomie und der Laserentfernungsmessungen zum Mond erfordern noch die *Einführung eines erweiterten Erdraumes*. Unter diesem noch umstrittenen Begriff versteht man den Erdkörper und seine planetare Umgebung. Die

beiden zuletzt genannten Beobachtungsverfahren werden auch dazu führen müssen, die geodätische Modellbildung im Sinne eines relativistischen Raum-Zeit-Verständnisses zu ergänzen [15].

Zwangsläufig wird die Geodäsie mehr und mehr einen interdisziplinären Charakter annehmen, weil die Lösung der mit der Modellbildung verbundenen Probleme nur in Zusammenarbeit mit Astronomen und Geophysikern zu lösen sind. Die neuen Beobachtungstechniken und die Auswertung der damit gewonnenen Daten erfordern auch enge Kontakte zur Nachrichtentechnik und Informatik.

2. Überblick über die geodätischen Raumverfahren

Aus zeitlichen Gründen kann ich weder auf die historische Entwicklung der Geodäsie noch auf die seit Mitte des 19. Jahrhunderts entwickelten Methoden der Erdmessung eingehen. Dies wäre sehr aufschlussreich, weil dann der Fortschritt durch den Einsatz geodätischer Raumverfahren noch deutlicher zutage treten würde. Mir bleibt nur die Wahl, die letzten hundert Jahre Geodäsie etwa so zusammenzufassen: Die klassischen Theorien und Methoden für die Positionierung und die Bestimmung von Erdfigur und Erdschwerefeld haben zu bemerkenswerten Ergebnissen geführt. Der entscheidende Durchbruch ist aber erst in den letzten 25 Jahren gelungen. *Neue Technologien*, wie z. B. die elektromagnetische Entfernungsmessung, die elektronische Datenverarbeitung, um nur einige zu nennen, haben die Arbeitsweise der Geodäten sehr verändert. Das entscheidende Ereignis, insbesondere für die Lösung globaler Fragestellungen der Erdmessung, aber war und ist die *geodätische Nutzung künstlicher Erdsatelliten*. Am 4. Oktober 1957 wurde SPUTNIK I gestar-

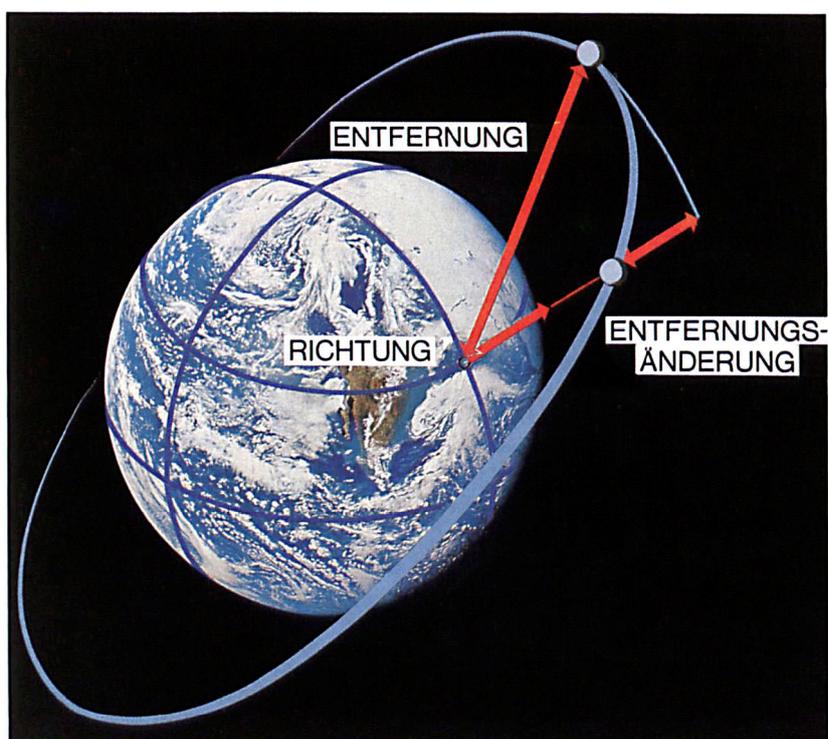


Abb. 1: Beobachtung von Richtungen, Entfernungen und Entfernungsänderungen nach Satelliten.

tet. Heute ist es kaum noch möglich, die Zahl der Satelliten anzugeben und die wissenschaftlichen und technischen Nutzungen künstlicher Erdsatelliten zu überschauen. Höhepunkte dieser Entwicklung waren die Mondlandungen: Auch für die Geodäsie waren diese bedeutsam, wurden doch bei den amerikanischen Mondflügen Apollo 11, 14 und 15 und bei den unbemannten sowjetischen Mondmissionen LUNA 17 und LUNA 21 Reflektoren für *Laserentfernungsmessungen zum Mond* aufgestellt.

Die künstlichen Erdsatelliten haben der Geodäsie neue Wege für die Positionierung und die Bestimmung von Figur und Schwerefeld der Erde eröffnet. – Die erreichten Genauigkeiten ermöglichen nicht nur einen Einsatz bei der Landesvermessung, sondern lassen sogar eine Untersuchung geodynamischer Fragen zu. Zur geodätischen Nutzung der künstlichen Erdsatelliten und des Mondes ist jüngst noch die geodätisch-geophysikalische Nutzung der Radiointerferometrie, die sog. *Very Long Baseline Interferometry* (VLBI) getreten. – Damit sind die wichtigsten geodätischen Raumverfahren angesprochen, die ich in den Grundzügen vorstellen möchte.

Ich beginne mit der *Satellitengeodäsie*: Einen Satelliten kann man als Hochziel beobachten, als Messkörper im Gravitationsfeld der Erde nutzen und schliesslich als Träger von Messsystemen einsetzen. – An Beobachtungen, die man von der Erde aus zu Satelliten durchführen kann, sind Richtungen, Entfernungen und Entfernungsänderungen zu nennen (Abb. 1). Bis Ende der sechziger Jahre stand die *photographi-*

sche Richtungsbeobachtung mit speziellen Kammern nach aktiven und passiven Satelliten im Vordergrund.

Aktive Satelliten waren mit Blitzlampen ausgestattet, während die passiven Satelliten durch die Sonne beleuchtet wurden.

Werden Richtungen simultan in zwei Stationen beobachtet, so kann man daraus nach dem Prinzip der Stellartriangulation räumliche Netze aufbauen (Abb. 2). Wichtige Ergebnisse dieser *geometrischen Methode* waren z.B. das unter Leitung von Helmut Schmid erstellte US-Weltnetz und das westeuropäische Satellittriangulationsnetz WEST [10], [30]. – Da die photographische Richtungsbeobachtung wetterabhängig ist und die Genauigkeit wegen atmosphärischer Einflüsse nicht mehr zu steigern ist, hat man sie heute weitgehend aufgegeben. – Für die *Entfernungsmessung nach Satelliten* werden, ebenso wie bei den terrestrischen Verfahren, sowohl Mikrowellen als auch Laserlicht benützt. – Für die Zwecke der Erdmessung und Geodynamik wird die genaue *Laserentfernungsmessung* bevorzugt. Dabei ergibt sich die Entfernung aus der Laufzeit eines Laserimpulses, der auf der Bodenstation gesendet und nach der Reflexion am Satelliten dort wieder empfangen wird. Dafür sind spezielle Satelliten erforderlich, deren Oberfläche mit zahlreichen Retroreflektoren ausgestattet sind, wie z.B. STARLETTE und LAGEOS. – Neuere Messsysteme erlauben Messungen bei Tag und Nacht, weisen eine Genauigkeit von $\pm 1 \dots 3$ cm auf und ermöglichen auch eine Distanzmessung nach den ca. 380 000 km von der Erde entfernten Reflektoren auf dem Mond. Nachteilig ist, dass Lasermessungen wetterabhängig sind.



Abb. 2: Aufbau räumlicher Netze mit Hilfe der Satellittriangulation.

Wetterunabhängig sind *Entfernungsmessungen mit Radiowellen*, wobei freilich die Genauigkeit wegen der schwierigen Erfassung des Zustandes von Troposphäre und Ionosphäre geringer ist.

Dabei werden die ionosphärischen Einflüsse mit Hilfe von Messungen auf verschiedenen Frequenzen wenigstens teilweise eliminiert.

Eine wichtige Rolle spielt die *Messung von Entfernungänderungen*, wobei der Doppler-Effekt, d.h. die durch die relative Geschwindigkeit des Satelliten gegenüber dem Beobachtungsort eintretende Frequenzänderung des vom Satelliten gesendeten Signals ausgenutzt wird.

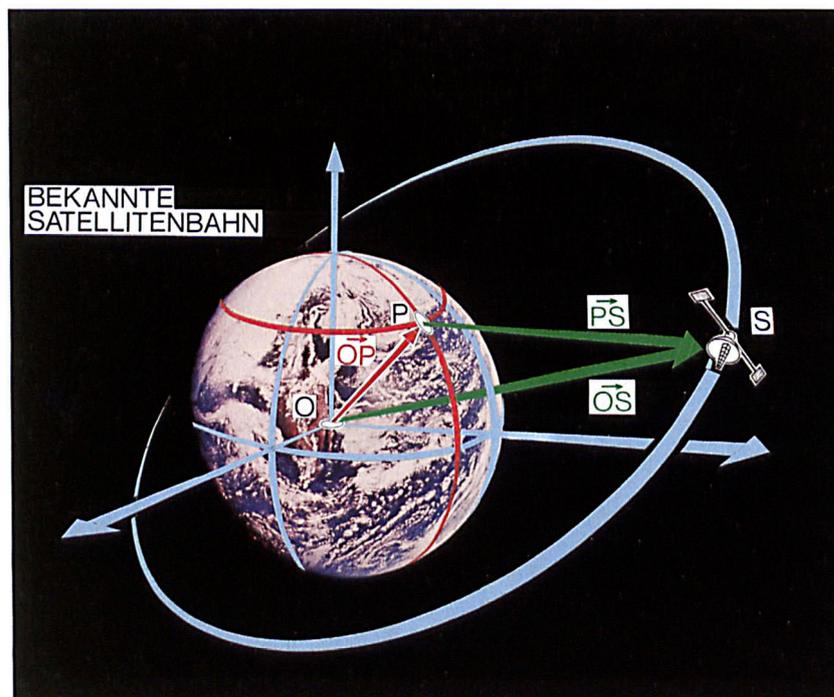
Der Doppler-Effekt ist aus dem Alltag bekannt: Fährt ein Rettungswagen an uns vorbei, so ändert sich die Tonhöhe des Warnsignals. – Eine zeitliche Integration der Frequenzänderung liefert die Entfernungänderung pro Zeit.

Bei allen erwähnten Beobachtungsverfahren ist eine genaue *Messung von Zeitpunkten und Zeitintervallen* nötig, d.h. man braucht auch präzise Zeitdienstanlagen, bestehend aus Quarz- und Atomuhren sowie Einrichtungen für den Vergleich mit Zeitskalen.

Ich greife nun die *dynamische Methode* auf und beginne mit der Positionsbestimmung nach der *Bahnmethode* (Abb. 3). Die Satellitenbahn sei aus Beobachtungen abgeleitet worden, wobei das Gravitationsfeld der Erde bekannt sein muss. Für

jeden Zeitpunkt lässt sich dann der geozentrische Ort \vec{OS} des Satelliten angeben. Beobachtet man den topozen-trischen Vektor \vec{PS} zum Satelliten, also Richtung und Entfernung, so lässt sich \vec{OP} , die geozentrische Lage des Beobachtungsortes, bestimmen. – Diese Methode wird in modifizierter Form in grossem Umfang praktisch eingesetzt. Statt der topozen-trischen Vektoren werden unter Ausnutzung des Doppler-Effektes Entfernungänderungen gemessen. Ist die Bahn wieder bekannt, so können Entfernungsdifferenzen für Positionierungen benützt werden. Darauf komme ich noch zurück.

Blieben wir noch bei der bekannten Satellitenbahn: Wird mit Hilfe der *Radaraltimetrie*, also aus der Laufzeit eines Radar-signals auf dem Weg Satellit—Meeresoberfläche und zurück, die Flughöhe eines Satelliten über dem Meer gemessen, so lässt sich die Meerestopographie und genähert auch das Geoid bestimmen (Abb. 4). Mit den Satelliten GEOS 3 und SEASAT 1 wurden für weite Teile der Ozeane aus den beobachteten Flughöhen die Meerestopographie und das Geoid bestimmt. – Diese Ergebnisse sind auch für die Ozeanographen von grosser Bedeutung. Leider gibt es derzeit keinen Satelliten mit einem Radaraltimetersystem. Es ist aber zu hoffen, dass der von der *European Space Agency* (ESA) geplante Satellit ERS 1 (*European Remote Sensing Satellite*) Anfang der neunziger Jahre verfügbar ist. Die aus Altimeterdaten abgeleiteten Geoidundulationen können durch eine Inversion der Stokes-Integralformel auch für die *Bestimmung*

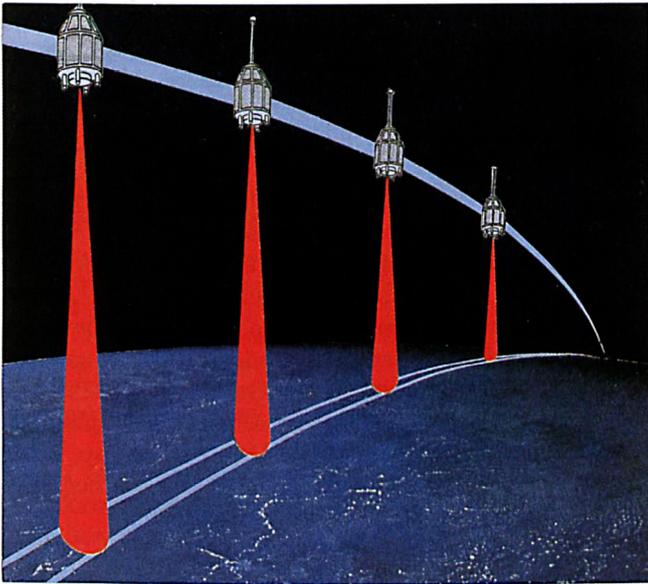


\vec{OS} GEOZENTRISCHE LAGE VON S
 \vec{PS} TOPOZENTRISCHE LAGE VON S
 \vec{OP} GEOZENTRISCHE LAGE VON P

$$\vec{OP} = \vec{OS} - \vec{PS}$$

Abb. 3: Positionsbestimmung bei bekannter Satellitenbahn.

BEKANNTE
SATELLITENBAHN



GEOIDPROFIL

MEERESTOPOGRAPHIE
≈ GEOID

Abb. 4: Bestimmung der Meerestopographie bzw. des Geoides mit Hilfe der Radar-Altimetrie.

von Schwereanomalien benutzt werden [26]. Die Genauigkeit der für $1^\circ \times 1^\circ$ -Blöcke bestimmten mittleren Schwereanomalien ist mit etwa $\pm 5 \dots 10$ mgal zu veranschlagen. Diese Ergebnisse zeigen sehr eindrucksvoll, wie für den Bereich der Weltmeere die Lücken in den terrestrischen Beobachtungen mit Hilfe von Satelliten geschlossen werden können (Abb. 5).

Die Beispiele zu den Bahnmethoden machen auch deutlich, dass die Bestimmung von Satellitenbahnen ein zentrales Problem der geodätischen Nutzung künstlicher Erdsatelliten darstellt. Auch diese Aufgabe, deren Lösung eine gründliche Kenntnis der Himmelsmechanik voraussetzt, wird heute von Geodäten wahrgenommen.

Die *allgemeine Lösung der dynamischen Methode* ist sehr viel komplizierter: Ausser den Stationskoordinaten sind auch die Satellitenbahnen und die Parameter des Gravitationsfeldes der Erde zu bestimmen. Es treten also sehr viele Unbekannte auf, für deren Bestimmung eine grosse Zahl von Beobachtungen nach verschiedenen Satelliten von möglichst gleichmässig über die Erde verteilten Beobachtungsstationen nötig ist. – Die Lösung der dabei auftretenden grossen Gleichungssysteme bereitet auch an modernen Grossrechenanlagen erhebliche Probleme. – Nach dieser dynamischen Methode sind in den letzten Jahren zahlreiche *Erdmodelle* bzw. *Standard-Erden* abgeleitet worden. Eine Standard-Erde umfasst die Koordinaten der beteiligten Beobachtungsstationen, eine mehr oder weniger grosse Zahl von Koeffizienten der Kugelfunktionsentwicklung des Gravitationspotentials der Erde bzw. das daraus abgeleitete Geoid. – Als Beispiel sei die kürzlich in München gerechnete Standard-Erde GRIM 3-L1 vorgestellt [27]: Bei dieser Lösung wurden alle schon bei GRIM 3 benutzten Richtungs- und Entfernungsmessungen eingeführt. Hinzu kamen 16 Monate LAGEOS-Beobachtungen von 20 Tracking-Stationen sowie $1^\circ \times 1^\circ$ Freiluft-Schwereanomalien (22 604 terrestrisch beobachtete bzw. prädiizierte Werte und 34 645 aus SEASAT-Altimeterdaten abgeleitete Werte).

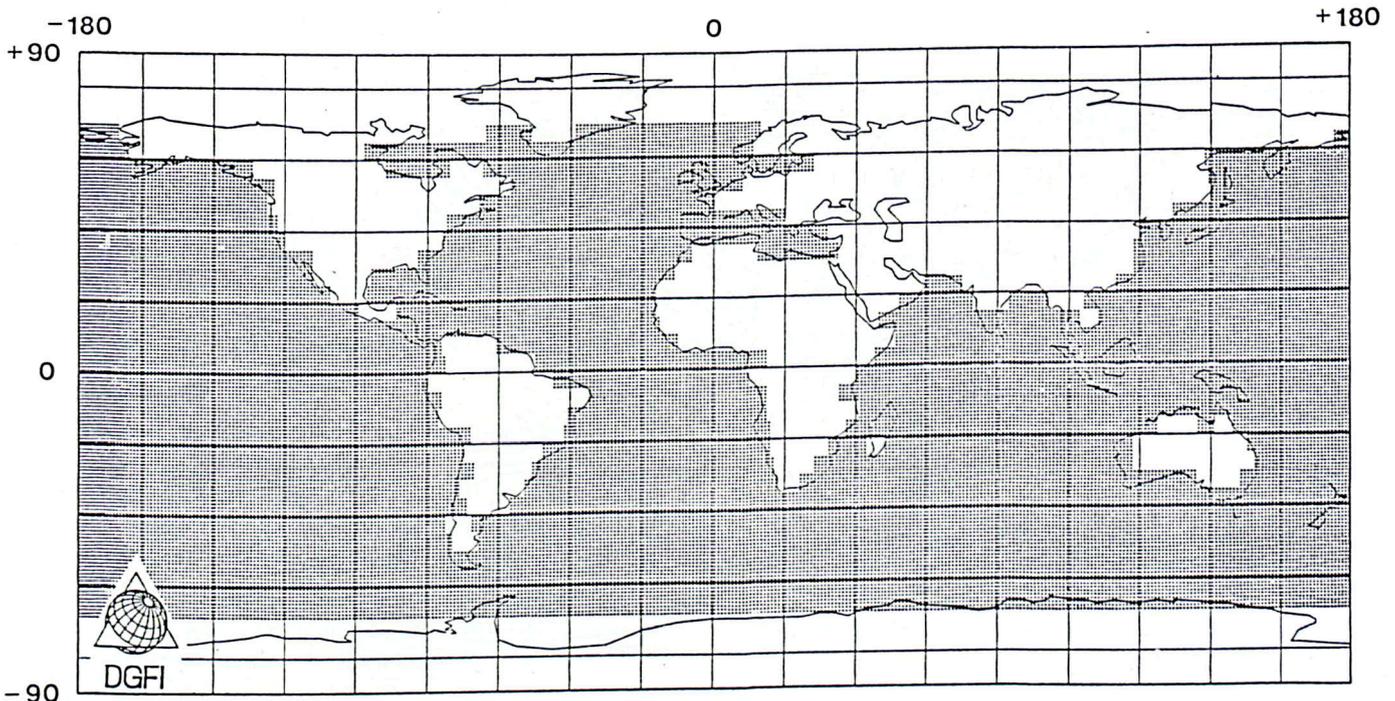


Abb. 5: Geographische Verteilung der aus SEASAT-Altimetermessungen abgeleiteten $1^\circ \times 1^\circ$ -Schwereanomalien. (Nach Angaben von R. H. Rapp vom August 1982 bzw. Januar 1983.)

Für die *Darstellung des Gravitationspotentials* wurden die harmonischen Koeffizienten bis Grad und Ordnung 36 bestimmt und für eine Geoidberechnung benützt (Abb. 6). Weiter wurden geozentrische Koordinaten für 109 Stationen bestimmt. Die mittleren Fehler der Koordinaten liegen für die 20 LAGEOS-Tracking-Stationen bei $\pm 0,1$ m, bei den übrigen Beobachtungsstationen bei etwa $\pm 0,5$ m.

Die Hinzunahme der Laserentfernungsmessungen nach LAGEOS hat zu einer erheblich besseren Bestimmung der langwelligen Anteile im Gravitationsfeld und (für 20 Stationen) zu sehr genauen geozentrischen Koordinaten geführt. – Auf letztere ist noch zurückzukommen.

Die benützten Beobachtungen machen deutlich, dass die klassischen Methoden der Geodäsie durch die Raumverfahren nicht überholt sind: Handelt es sich doch bei GRIM 3-L1 wie bei den meisten Standard-Erden um eine *kombinierte Lösung*, d.h. neben Satellitenbeobachtungen werden auch terrestrisch gemessene bzw. prädierte Schwereanomalien verwendet.

Jetzt lassen sich auch die *Grenzen der Raumverfahren* angeben: Vereinfacht könnte man sagen, dass die Satellitenmethoden den globalen Rahmen liefern, in den die Ergebnisse der klassischen Verfahren eingefügt werden können. Dies gilt nicht nur für die Bestimmung des Gravitationsfeldes, sondern auch für die Errichtung von Festpunktfeldern.

Das Erdmodell GRIM 3-L1 kann von Beobachtung und Modellbildung her als optimal angesehen werden. Eine entscheidende Verbesserung der dynamischen Methode ist künftig aber weder von der Beobachtungsseite noch von der Methodik her zu erwarten.

Es könnte sinnvoll sein, künftig auch Beobachtungen nach den NAVSTAR-Satelliten des GPS-Systems einzubeziehen, um die bisher ungenügende Stationsverteilung auf der Erde zu verbessern. Andererseits lässt sich, selbst wenn man die Flughöhe der Satelliten absenkt, kaum noch eine weitergehende Sensitivierung gegenüber den Termen des Gravitationspotentials erreichen. Übrigens würde man bei einer Erhöhung des Entwicklungsgrades für die Potentialentwicklung bei der Invertierung der Gleichungssysteme bald an die Grenzen unserer heute verfügbaren Grossrechner stossen.

Ich verfolge das Thema der Gravitationsfeldbestimmung nicht weiter und füge nur einige Bemerkungen an: Die Satellitenaltimetrie hat einen grossen Fortschritt gebracht, wie z.B. die aus SEASAT-1-Messungen für den Bereich der Ozeane abgeleiteten Schwereanomalien zeigen. Man sollte aber nicht vergessen, dass die Altimetrie primär die Meerestopographie liefert. Um das Geoid mit gleicher Genauigkeit zu bestimmen, müssten die Modelle für die Meerestopographie auf einige Dezimeter genau sein. – Die Altimetrie ist also, selbst wenn sie noch so genau misst, im Grunde keine Methode der Gravitationsfeldbestimmung.

Noch ein anderes Problem ist zu erwähnen: Mit der Inbetriebnahme kontinuierlich arbeitender Trackingsysteme im Mikrowellenbereich (GPS, PRARE etc.), mit weiteren Altimetriemissionen (ERS 1) und etwaigen SST- oder Gradiometermissionen wird eine ungeheure Menge an Messdaten produziert. Um hier mit der Auswertung Schritt zu halten, d.h. keine Datenfriedhöfe zu erzeugen, wird man nicht nur gut strukturierte Datenbanken einrichten, sondern auch für weitgehend automatische Rechenabläufe sorgen müssen.

Zur Bestimmung der *Feinstruktur des Gravitationsfeldes* kann weder die Bahnmethode noch die Radaraltimetrie beitragen, auch wenn die Messgenauigkeiten noch weiter gesteigert werden sollten. Auch terrestrische Methoden helfen hier nicht weiter.

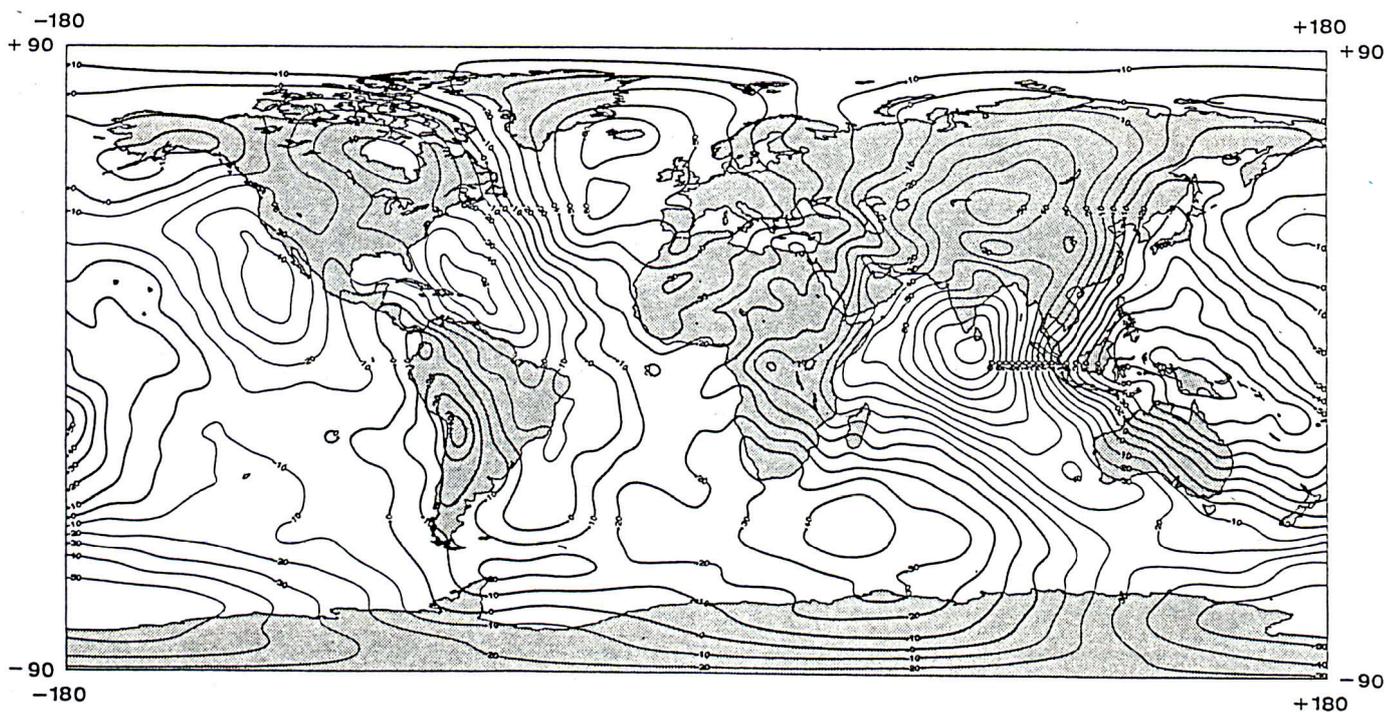


Abb. 6: GRIM 3-L1 Geoid (1984).

Eine Lösung dieses Problems ist von den in Entwicklung befindlichen Methoden, dem *Satellite to Satellite Tracking* (SST) und der *Satellitengradiometrie* zu erwarten [18], [29].

Auch die geodätische Nutzung der *Laserentfernungsmessung zum Mond*, häufig als *Lunar Laser Ranging* (LLR) bezeichnet, sei angesprochen. Durch die geodätische Nutzung der künstlichen Erdsatelliten ist der Mond bei der Bestimmung geometrischer und physikalischer Erdparameter für längere Zeit etwas in den Hintergrund getreten.

Auch wurde teilweise vergessen, dass die Idee, einen Erdtrabant für die Bestimmung von Figur- und Feldparameter der Erde zu benutzen, nicht erst in den 60er Jahren entstanden ist. So hat F.R. Helmert schon 1884 aus der Präzession des Mondknotens die Erdabplattung zu $\alpha = 1:298,3$ bestimmt. – Erinert sei auch an die von Markowitz (Mondkamera) und O'Keefe (Sternbedeckungsmethode) entwickelten kunstreichen Positionierungsverfahren mit Hilfe des Mondes.

Neues Interesse hat der Mond nach der Aufstellung von Reflektoren im Rahmen der Apollo- und Luna-Missionen gefunden, die eine Laser-Entfernungsmessung zum Mond auf wenige cm genau ermöglichen [9]. Freilich liegen bis heute nur wenige operationelle Stationen vor: Das MacDonal Observatory/Texas, das Observatoire Grasse in Südfrankreich, eine sowjetische Station auf der Krim, die Station Haleakala/Hawaii und die Station Ororal in Australien.

Auch der Sonderforschungsbereich 78 Satellitengeodäsie der TU München hat Arbeiten zu Lunar Laser Ranging in sein Programm aufgenommen. Wir hoffen, 1988 in Wettzell ein neues Laserentfernungsmesssystem in Betrieb zu nehmen, das auch Entfernungsmessungen zum Mond ermöglicht.

Genau Mondentfernungen liefern wertvolle Informationen für die Bestimmung geodätisch, geophysikalisch und astronomisch interessanter Größen, z.B. geozentrische Koordinaten der Stationen und selenozentrische Koordinaten der Reflektoren auf dem Mond. Die geozentrischen Koordinaten können sowohl für die Vermarkung eines terrestrischen Bezugssystems als auch für die Ableitung von Basislinien und damit zur Untersuchung grossräumiger Plattenbewegung genutzt werden. Auch lassen sich Aussagen über Gestalt, Bahn und Rotation des Mondes sowie die Grobstruktur des Mondgravitationsfeldes gewinnen. – Für Geodäsie und Astronomie gleichermaßen von Interesse ist die Möglichkeit, die Theorien für Präzession und Nutation zu prüfen. Auch die Erdrotationsparameter lassen sich bestimmen. Ja, es dürfte sogar möglich werden, die relativistische Gravitationstheorie, wie z.B. die Veränderlichkeit der Gravitationskonstanten, zu testen.

Als jüngstes geodätisches Raumverfahren ist die Nutzung radioastronomischer Beobachtungen, die sog. *Very Long Baseline Interferometry* (VLBI) darzustellen: Extragalaktische Radioquellen, sog. Quasare, senden Radiowellen im Zentimeter- bzw. Dezimeter-Bereich aus, die mit grossen Antennen (Radioteleskopen) aufgefangen werden können.

Bei diesen extragalaktischen Radioquellen sind bisher etwa 70 ausserhalb des Milchstrassensystems liegende Objekte optisch einigermaßen sicher identifiziert worden. Man kann drei Gruppen von Quasaren unterscheiden: Normale Sternsysteme, Haufen von Sternsystemen und Sternsysteme, die im Vergleich mit ihrer optischen Helligkeit sehr intensive Radioquellen bilden und daher auch als Radiosterne bezeichnet werden.

Kombiniert man zwei Radioteleskope miteinander, so entsteht ein sog. Radiointerferometer, mit dem man VLBI betreiben kann. VLBI ist eine Präzisionsmessmethode: Die Astrophysiker untersuchen damit die Struktur kosmischer Radioquellen mit einer bisher unübertroffenen Winkelauflösung (besser als 0,001") und bestimmen deren Positionen mit der gleichen Genauigkeit.

Die Geodäten versuchen, zwischen Punkten auf der Erdoberfläche Distanzen von interkontinentalem Ausmass mit cm-Genauigkeit abzuleiten. – Auch ist weltweit eine Übertragung von Zeit und Frequenz mit höchster Genauigkeit möglich.

Die geodätische Nutzung lässt sich so charakterisieren (Abb. 7): In zwei Punkten P_1 und P_2 , die Tausende von Kilometern voneinander entfernt sein können, seien Radioteleskope mit entsprechenden Empfangs- und Registrieranlagen sowie Atomuhren vorhanden. Vergleicht man die in den Punkten P_1 und P_2 ankommenden Wellenzüge, so ergibt sich ein zeitabhängiger Phasenunterschied und infolge des geometrischen Wegunterschiedes auch ein Laufzeitunterschied. Wird dieser Laufzeitunterschied gemessen, so lässt sich bei bekannter Richtung zum Quasar die Entfernung P_1P_2 ableiten. Wegen der grossen Distanz der Antennen erfolgen Signalempfang bzw. Signalregistrierung auf jeder Station

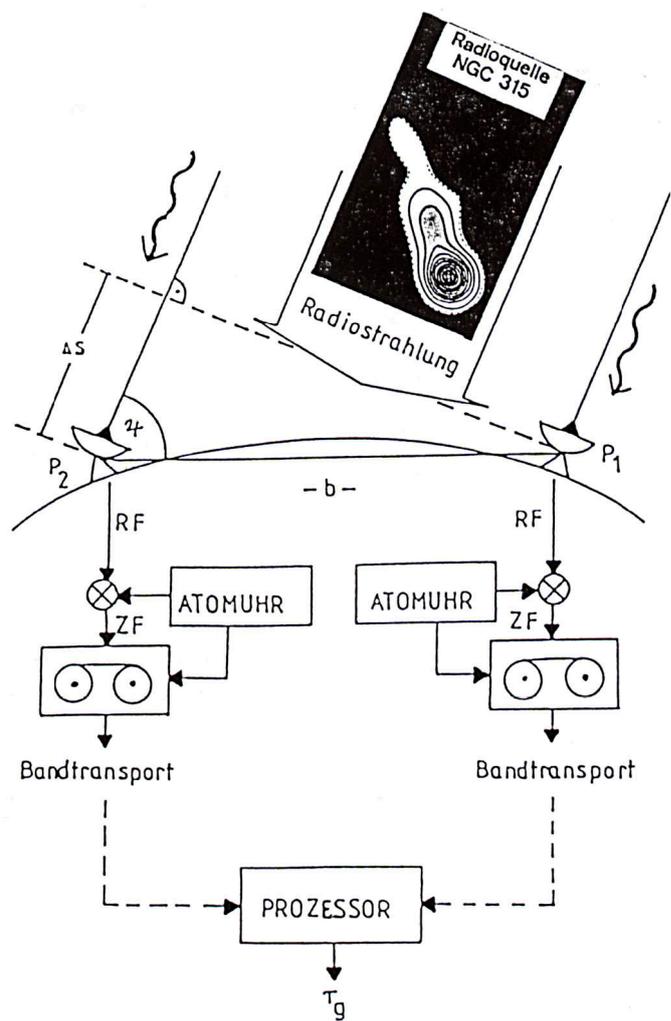


Abb. 7: Grundprinzip der geodätischen Nutzung der Radiointerferometrie.

getrennt auf Magnetbändern, versehen mit entsprechenden Zeitmarken von Atomuhren. Anschliessend werden die registrierten Signale in einer Rechenanlage korreliert, woraus sich der Laufzeitunterschied und damit die Basis bestimmen lässt [6], [25].

Die aus der Korrelation bestimmte Laufzeit muss noch wegen Aberration, wegen atmosphärischer Einflüsse und insbesondere wegen instrumenteller Fehler korrigiert werden. – Zur Erfassung bzw. Elimination ionosphärischer Einflüsse wird mit verschiedenen Frequenzen gearbeitet, z.B. im X- und S-Band, d.h. mit Frequenzen von 8 GHz bzw. 2 GHz.

Wir haben Ende 1983 auf unserer Fundamentalstation Wettzell ein 20-m-Radioteleskop für geodätische VLBI-Experimente in Betrieb genommen [32], [35].

Die Nachführgeschwindigkeiten in Azimut und Höhe sind so gewählt, dass neben Messungen zu Quasaren auch Beobachtungen zu den Satelliten des GPS-Systems möglich sind. – Um die bei radiointerferometrischen Beobachtungen nötige extrem hohe Zeitstabilität über kürzere Zeiträume zu sichern, musste die vorhandene Zeitdienstanlage, bestehend aus 3 Cäsium- und 4 Rubidium-Frequenznormalen um 2 Wasserstoffmaser erweitert werden.

Auch wurde eine langfristige Zusammenarbeit im Rahmen des Projektes IRIS (*International Radio Interferometric Surveying*) mit dem *National Geodetic Survey* (NGS) der USA vereinbart. Die im Projekt IRIS seit Anfang 1984 im Fünftagesrhythmus ausgeführten Beobachtungen der Station Wettzell erfolgen im Verbund mit drei Stationen (Westford, Fort Davis und Richmond) in den USA und der Station Onsala in Schweden.

Zwischen diesen Messungen von je 24 Stunden Dauer, die der Bestimmung der Erdrotation (Polkoordinaten und Rotationsphase) dienen, werden tägliche Messungen auf der Basislinie Wettzell–Westford zur Bestimmung der Rotationsschwankungen ausgeführt. Hinzu kommen noch Messprogramme im Rahmen des von der NASA koordinierten Projektes zur Dynamik der Erdkruste. Schliesslich werden sogar Experimente zur relativistischen Lichtablenkung am Sonnenrand auf der Basis Wettzell–Onsala durchgeführt.

Die bisher erzielten Ergebnisse sind sehr erfreulich; ich komme darauf noch zurück.

3. Einsatz geodätischer Raumverfahren in der Landesvermessung und Geodynamik

Für die *Landesvermessung* sind genaue Festpunktfelder zu errichten, d.h. es sind die genauen Koordinaten vieler Punkte zu bestimmen. – Wiederholt man diese genauen Koordinatenbestimmungen in regelmässigen Zeitabständen, so liefern die zeitlichen Änderungen der Koordinaten Aussagen über das kinematische Verhalten des Punktfeldes, d.h. einen wichtigen *Beitrag zur Geodynamik*. Natürlich sind die Festpunkte der jeweiligen Aufgabenstellung entsprechend auszuwählen.

Der Methodenüberblick zeigte, dass die geodätischen Raumverfahren entweder geozentrische Koordinaten (SLR- und LLR-Methode) oder Basislinien (VLBI) liefern.

Geozentrische Koordinaten für Satellitenbeobachtungsstationen erhält man, wie schon erwähnt, aus Standard-Erden. Beim Erdmodell GRIM3-L1 wurden die Koordinaten für insgesamt 109 Stationen bestimmt. Für die 20 an der Laserentfernungsmessung nach LAGEOS beteiligten Stationen betragen die mittleren Koordinatenfehler wenige Zentimeter (Tab.).

Station		Fehler m		
Name	No.	σ_x	σ_y	σ_z
HAWXAA	7120	.04	.07	.05
OUNO81	7051	.06	.07	.05
GLDST2	7115	.04	.05	.04
OWNSU2	7114	.05	.05	.05
ML0104	7082	.10	.11	.07
FTDAUS	7086	.05	.05	.05
COLRLS	7112	.07	.08	.06
RAMLAS	7069	.63	.43	.49
STALAS	7063	.01	.05	.05
ML0402	7102	.06	.06	.06
GSFCLS	7105	.08	.08	.06
ARELAS	7907	.06	.05	.06
HAYSTK	7091	.04	.05	.04
NATLAS	7929	.11	.14	.13
GRASSE	7835	.08	.10	.08
WETZEL	7834	.07	.09	.05
YARLAS	7090	.07	.04	.04
ORRLAS	7943	.05	.06	.04
ML0802	7092	.06	.10	.08
SAMOA1	7096	.06	.09	.07

Tab.: Mittlere Koordinatenfehler der 20 den Satelliten LAGEOS beobachtenden Laserstationen.

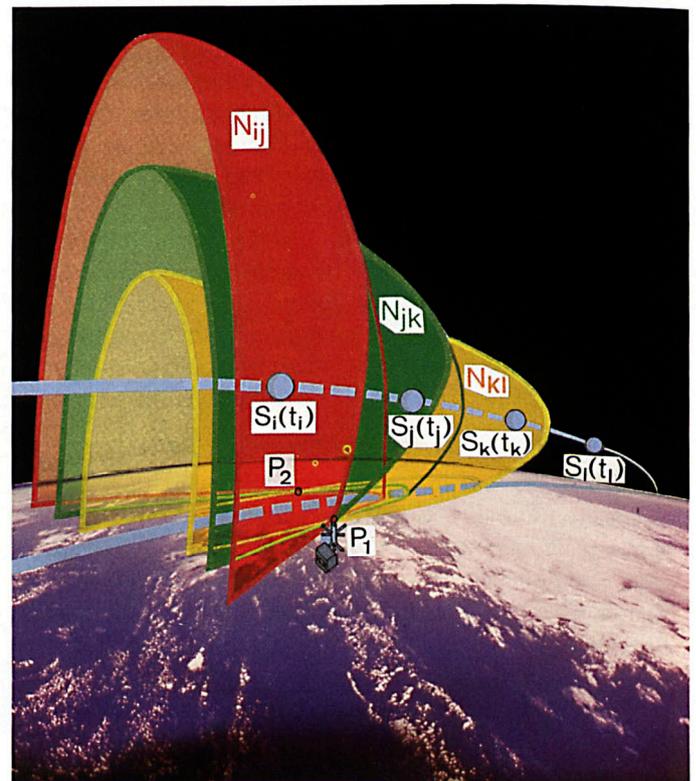


Abb. 8: Positionsbestimmung mit Hilfe von Entfernungsdifferenzen.

Voraussetzung für derartige Genauigkeiten ist allerdings, dass über längere Zeiträume beobachtet wird, ein gut bestimmtes Gravitationsfeld vorliegt und zuverlässige Werte für die Erdrotationsparameter gegeben sind. – Für die übrigen Stationen von GRIM3-L1 liegen die Genauigkeiten der Koordinaten bei einigen Dezimetern. Wie sind diese Ergebnisse zu bewerten? Die im Rahmen von Standard-Erden bestimmten Koordinaten tragen zur Realisierung eines *terrestrischen Bezugssystems* bei. Auch lassen sich daraus *übergeordnete Kontrollnetze* bilden, mit deren Hilfe Masstab und Orientierung nationaler Netze überprüft und Parameter für die Transformation von Datumskordinaten in einheitliche geozentrische Koordinaten hergeleitet werden können.

Auf die Definition bzw. Realisierung von Bezugssystemen kann ich nicht näher eingehen. Erwähnt sei, dass diese Fragen für eine deformierbare Erde noch nicht befriedigend gelöst sind.

Die Stationskoordinaten von Standard-Erden liefern auch einen *Beitrag zur globalen Geodynamik*: Werden derart genaue Koordinatenbestimmungen regelmässig wiederholt, so geben die zeitlichen Änderungen der Koordinaten Auskunft über die *Bewegung der Kontinente* [41].

Für die Schaffung von *Festpunktfeldern bei nationalen Landesvermessungen* sind diese Methoden bzw. Ergebnisse nicht geeignet, weil nur wenige stationäre Laserentfernungsmessanlagen verfügbar sind. – Spätestens an dieser Stelle wird man ohnedies fragen, ob der Einsatz von Satelliten für diese Aufgabe wirtschaftlich gerechtfertigt ist. Bei der Antwort auf diese Frage muss man differenzieren, d. h. zwischen der völligen Neubestimmung eines Festpunktfeldes und der Fortführung eines klassischen Triangulationsnetzes unterscheiden.

Bei einer Neuanlage – diese Aufgabe stellt sich nur noch für wenige Länder – wird man zumindest das Grundlagennetz mit Satellitenmethoden bestimmen. Für die Punkte der Folgenetze ist zu prüfen, ob nicht terrestrische Methoden gleichzeitig zu verwenden sind. Die Diskussion hierüber ist voll im Gange. – Wie ist diese Frage für die geodätischen Kulturländer zu beantworten, die in den letzten 50 bis 100 Jahren genaue Festpunktfelder geschaffen und laufend fortgeführt haben? Allein aus wirtschaftlichen Gründen wird man diese Landesvermessungswerke, die ja nicht nur die Koordinaten der Festpunktfelder, sondern auch die Koordinaten der fast nicht zählbaren Grenzpunkte umfassen, bis weit ins 21. Jahrhundert hinein fortführen. Satellitenmethoden werden zunächst also nur dazu dienen, bestehende Festpunktfelder zu überprüfen, zu verbessern und zu ergänzen. Freilich sollten die Beobachtungen stets so angeordnet und in Datenbanken gespeichert werden, dass sie später für eine teilweise oder vollständige Neubearbeitung der Festpunktfelder geeignet sind.

Auch die inzwischen verfügbaren *mobilen Laserentfernungsmesssysteme* sind für die Landesvermessung nicht geeignet, weil der Betrieb dieser Instrumente aufwendig und kostspielig ist [28]. Wir haben seit Anfang 1986 im Rahmen des WEGENER/MEDLAS-Projektes ein mobiles Lasersystem für die Beobachtung eines *Geodynamiknetzes im östlichen Mittelmeerraum* eingesetzt [37], [44].

Der Betrieb des Gerätes bringt uns fast an den Rand der personellen und finanziellen Leistungsfähigkeit.

Neben den beiden europäischen Geräten werden 1987 auch Geräte aus den USA eingesetzt. Gelingt es, dieses Netz 1986 erstmals auszumessen – die Netzkonfiguration musste aus politischen Gründen mehrfach geändert werden – und diese Messungen im Zweijahresrhythmus zu wiederholen, so wird es in einem Jahrzehnt erste Aussagen über die komplizierten Bewegungsvorgänge in diesem Raum geben. Natürlich ist das MEDLAS-Projekt nur ein erster Schritt: Für eine Erfassung der *kleinräumigen Krustenbewegungen* sind dicht angelegte Punktfelder auszumessen, wofür noch andere Raumverfahren und auch terrestrische Beobachtungen nötig sind. – Wenigstens erwähnt sei das im Raum Sizilien angelegte und inzwischen vermarktete Geodynamiknetz.

Welche alternativen Raumverfahren stehen zur Verfügung? Fast schon vergessen ist die Möglichkeit eines *Spaceborne-Lasersystems*. Wir hatten vor Jahren in einer Studie für die ESA nachgewiesen, dass ein solches System instrumentell realisierbar und von der Genauigkeit her ausreichend wäre. Die Idee wurde aber nicht weiter verfolgt.

Bleiben schliesslich die *Mikrowellenverfahren*, die wetterunabhängig sind, freilich – zumindest bisher – wegen einer Reihe nicht erfassbarer Einflüsse aber weniger genaue Ergebnisse liefern. – In grossem Umfang genutzt werden seit 1967 die Satelliten des *Navy Navigation Satellite System (NNSS)* der USA. – Gemessen werden dabei, wie schon erläutert, Entfernungsdifferenzen. Liegen die Messungen für mindestens vier bekannte Satellitenpositionen S_p, S_j, S_k, S_l vor, so lässt sich die Lage des Beobachtungsortes P_1 als Schnitt dreier Hyperboloide festlegen (Abb. 8). Diese operative Ortung war zunächst nur für Navigationszwecke gedacht. – Für die Geodäsie wurde diese Methode eine wertvolle Hilfe bei der Landesvermessung wenig erschlossener Gebiete und bei der Überprüfung bestehender Triangulationsnetze [34].

Durch eine Beobachtungshäufung, die Verwendung präziser Ephemeriden und die Anwendung der sog. Translokationsmethode, konnten Genauigkeiten von wenigen Dezimetern erreicht werden. Als Beispiel für viele Einsätze dieser Methode sei die 1984 für das Europäische Dreiecksnetz RETrig durchgeführte Beobachtungskampagne RETDOC gezeigt (Abb. 9).

Für die Bestimmung von Krustenbewegungen, wobei es ja um Zentimeter bzw. Millimeter geht, reicht die Methode verständlicherweise nicht aus. Einige Versuche, aus langfristigen stationären Beobachtungsreihen horizontale Bewegungen abzuleiten, waren nicht überzeugend [1].

Seit Mitte der 70er Jahre wird in den USA das NAVSTAR (*NAVigation System with Time And Ranging*) Global Positioning System, kurz GPS, entwickelt. Seine Anwendungsmöglichkeiten wurden inzwischen ausführlich diskutiert. John Bossler, Direktor des National Geodetic Survey (NGS) der USA, sprach sogar von einer geodätischen Revolution [5]. In der Tat wird dieses neue Satellitensystem aufgrund der erreichbaren Genauigkeiten die Arbeitsweise des Geodäten verändern, nicht nur in der Wissenschaft, sondern auch in der Praxis [7], [33], [40].

European Triangulation Networks
Index map of the adjustment phase II

Triangulations européennes
Schéma de la phase II de compensation

Europäische Hauptnetztriangulationen
Netzbild der Ausgleichsphase II

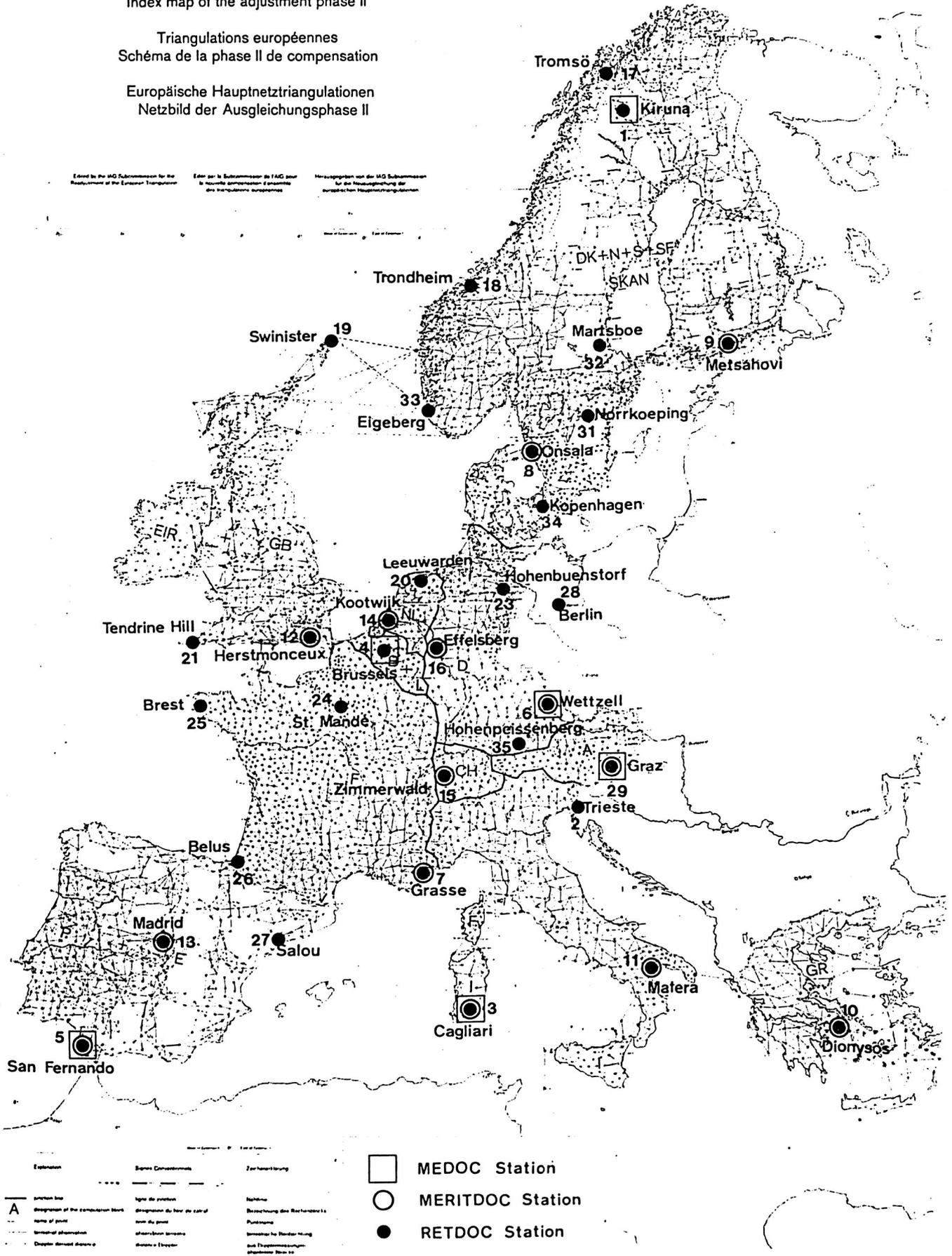


Abb. 9: Stationen der Doppler-Beobachtungskampagne RETDOC.

Das *Global Positioning System* ist Chance und Herausforderung zugleich. Chance, weil damit geodätische und geodynamische Aufgaben gelöst werden können; Herausforderung, weil es sich ebenso wie beim Navy Navigation Satellite System um ein Navigationssystem handelt, das nur mit besonderen Beobachtungstechniken und Auswerteverfahren die geodätisch notwendige Genauigkeit liefern kann. – Sorge bereitet, dass das GPS-System, das Ende 1988 voll ausgebaut sein soll¹, in der Zuständigkeit des US Department of Defence (DOD) liegt, und über eine freie zivile Nutzung nicht endgültig entschieden ist.

Ich stelle GPS in den Grundzügen vor und versuche, soweit die vorliegenden Erfahrungen dies zulassen, eine Bewertung der Methode.

Das GPS lässt sich in drei Teile gliedern: Das *Raumsegment* (Teil 1) wird 18 Satelliten auf sechs Bahnebenen umfassen (Abb. 10).² Die Bahnen sind genähert kreisförmig, die Flughöhe der Satelliten beträgt ca. 20 000 km, die Umlaufzeit etwa 12^h, die Bahnneigung ca. 55°. Die Satelliten sind so auf den Bahnebenen verteilt, dass sich für jeden Ort der Erde zu jeder Zeit vier Satelliten über dem Horizont befinden.

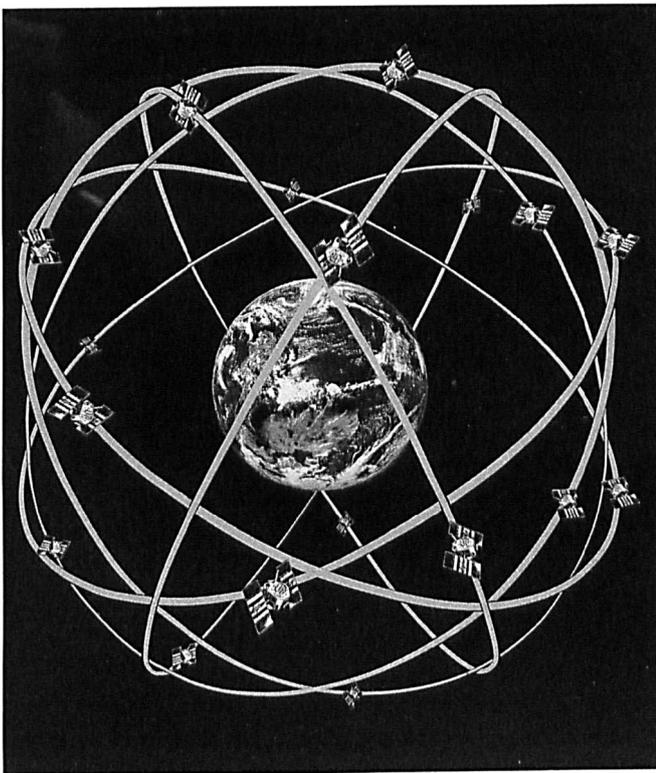


Abb. 10: GPS-Raumsegment, geplante Satellitenkonstellation.



Abb. 11: GPS-Kontrollsegment, ursprüngliche Konfiguration.³

Das *Kontrollsegment* (Teil 2) besteht aus vier Stationen: Guam, Hawaii, Elmendorf/Alaska und Vandenberg, der Master Control Station (Abb. 11). In diesen Stationen werden Entfernungen zu den Satelliten gemessen und die meteorologischen Daten erfasst. Die Master Control Station bestimmt daraus die Satellitenbahnen sowie die Korrekturen für die Satellitenuhren und speichert die aktuellen Bahnparameter, die Uhrkorrektur sowie die Atmosphärenparameter in die Satelliten ein. – Die Lage der Kontrollstationen macht deutlich, dass für eine Nutzung von GPS in aller Welt weitere Tracking-Stationen nötig sind. Auch Europa ist gut beraten, wenn es sich mit mindestens einer permanenten Station an der Bestimmung genauer Satellitenbahnen und der Überwachung des Koordinatensystems von GPS beteiligt.

Das *Nutzersegment* (Teil 3) besteht im wesentlichen aus einer Antenne, einem Empfänger und einem Prozessor für die Verarbeitung der beobachteten Daten; auf die geodätisch relevanten Empfänger ist noch zurückzukommen.

Ohne auf die nachrichtentechnischen Grundlagen der Messverfahren einzugehen, seien kurz die *Messprinzipien* angesprochen [2], [7], [12], [14]. Kernstück eines jeden Satelliten ist eine Atomuhr hoher Genauigkeit ($10^{-12} \dots 10^{-13}$). Aus der Frequenz dieses Oszillators werden zwei Trägersignale L1 und L2 mit Frequenzen von 1,575 GHz und 1,2276 GHz bzw. Wellenlängen von 19,05 cm und 24,45 cm erzeugt.

Die beiden Frequenzen dienen dazu, die ionosphärisch bedingten Laufzeitverzögerungen zu erfassen.

Die eigentlichen Navigationssignale sind den Trägerwellen als «Pseudo Random Noise» (PRN)-Signale aufmoduliert. Das L1-Signal enthält sowohl den präzisen P-Code als auch den

¹ Offiziösen Meldungen zufolge wird sich als Folge der Challenger-Katastrophe vom 28. Januar 1986 die Fertigstellung verzögern.

² Derzeit sind nur 7 Testsatelliten im Umlauf, die nur einige Stunden Messzeit pro Tag ermöglichen.

³ Die im Frühjahr 1986 entstandene Abbildung ist überholt. Das GPS-Kontrollsegment besteht jetzt aus den fünf weltweit verteilten Stationen Ascension Island, Diego Garcia, Kwajalein Atoll, Hawaii und Colorado Springs (Master Control Station).

weniger genauen C/A-Code. – Das L2-Signal enthält nur den P-Code.

Zur Übermittlung von Bahn- und Zeitinformationen ist noch ein Datensignal aufmoduliert.

Für die *Einzelpunktpositionierung bei der Navigation* wird die sog. (Pseudo-) Entfernungsmessung benutzt. Dabei sind für die Bestimmung der Koordinaten eines Punktes P sowie der Uhrkorrektur (Pseudo-) Entfernungsmessungen s_i nach vier Satellitenpositionen S_i nötig (Abb. 12a). Die für die Ableitung der Entfernung nötigen Signallaufzeiten T_i werden durch Kreuzkorrelation bestimmt.

Dabei wird das Navigationssignal mit einem im Empfänger erzeugten Referenzsignal des entsprechenden Codes verglichen.

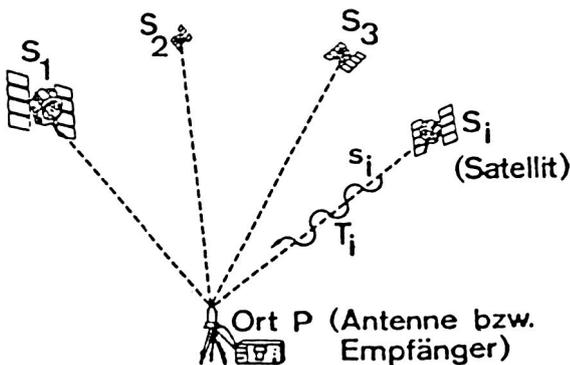


Abb. 12a: GPS-Positionierung im Navigationsmodus.

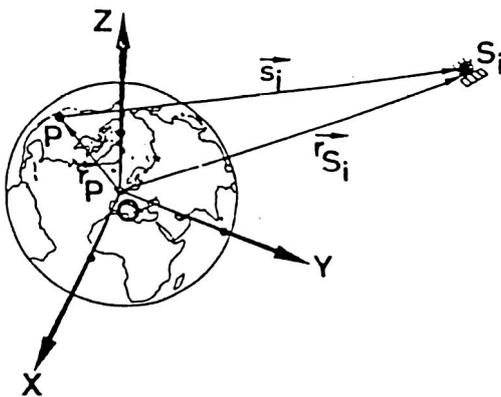


Abb. 12b: Zur Herleitung der Beobachtungsgleichung.

Eine Uhrkorrektur ΔT_P muss angesetzt werden, weil die Beobachtungsuhr am Ort P mit dem Zeitsystem der Satelliten nicht synchronisiert ist.

Für die (Pseudo-)Entfernung gilt dann (Abb. 12b):

$$s_i = c T_i = |\mathbf{r}_{S_i} - \mathbf{r}_P| + c \Delta T_P \quad (1)$$

mit

$\mathbf{r}_{S_i}, \mathbf{r}_P$: Geozentrische Positionen von S_i bzw. P im vereinbarten terrestrischen System (S_{VT})

c : Ausbreitungsgeschwindigkeit des Signals.

Mit

$$|\mathbf{r}_{S_i} - \mathbf{r}_P| = \sqrt{(X_{S_i} - X_P)^2 + (Y_{S_i} - Y_P)^2 + (Z_{S_i} - Z_P)^2}$$

erhält man aus (1) unmittelbar die Beobachtungsgleichung, woraus die Koordinaten X_P, Y_P, Z_P des Ortes P und die Uhrkorrektur ΔT_P bestimmt werden können.

Diese Positionierung entspricht der modifizierten Bahnmethode der Satellitengeodäsie. – Ebenso wie bei den TRANET-Satelliten des NNSS können auch Entfernungsdifferenzen beobachtet werden.

Für die *geodätische Anwendung* ist diese Positionierung mit einer Genauigkeit von bestenfalls $\pm 10 \dots 20$ m nicht geeignet. Es kommt vielmehr eine der Translokation vergleichbare *Differentialmethode* in Frage, bei der im einfachsten Fall mehrere Stationen nacheinander beobachtet und ausgewertet und aus den Ergebnissen Koordinatendifferenzen gerechnet werden (Abb. 13).

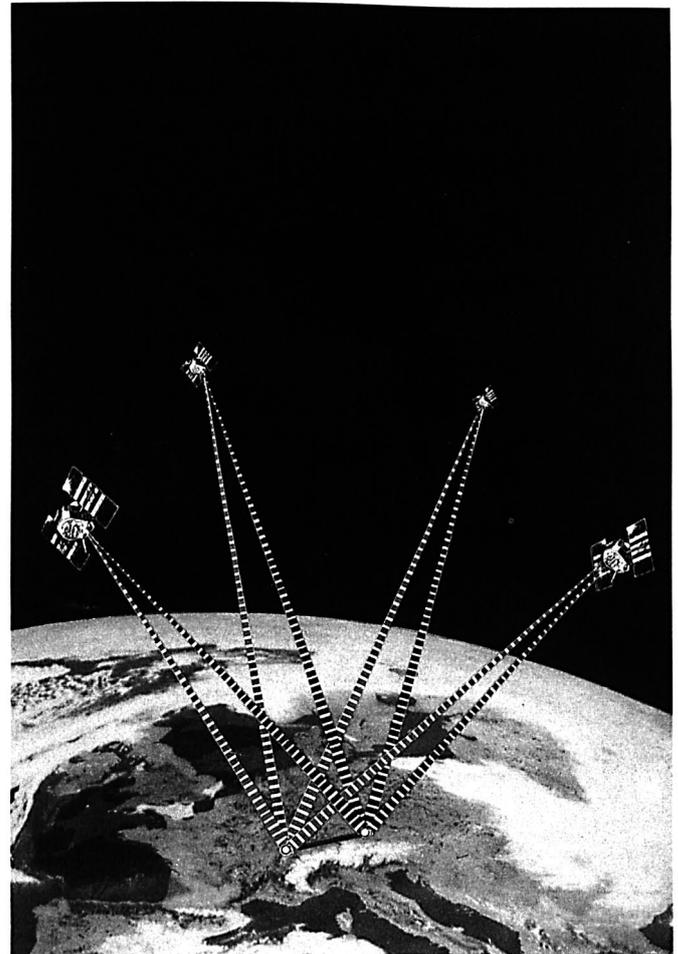


Abb. 13: Differentialmethode der GPS-Positionierung.

Sind die Punktabstände nicht zu gross, so können damit die Auswirkungen fehlerhafter Satellitenpositionen und Refraktionseinflüsse weitgehend eliminiert werden.

Bei mehrstündigen Beobachtungsreihen lassen sich bei diesem Verfahren Genauigkeiten von einigen Dezimetern erreichen. Die höchste, d.h. geodätisch interessante Genauigkeit ergibt sich, wenn die Trägerwelle für eine *Phasen- bzw. Phasendifferenzmessung* benützt wird. Freilich muss dafür der

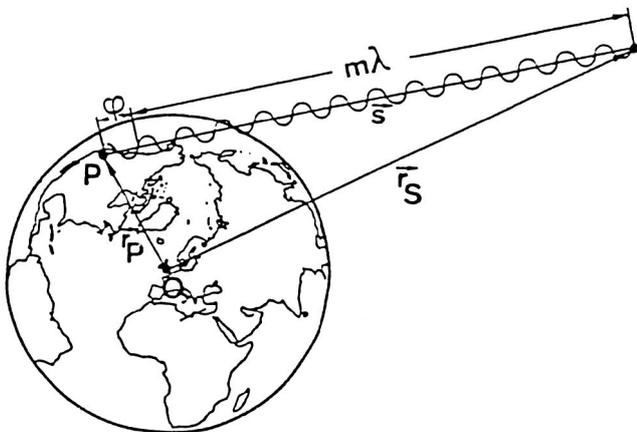


Abb. 14: Phasen- bzw. Phasendifferenzmessung.

P-Code bekannt sein, weil die Trägerwelle im Empfänger rekonstruiert werden muss. Da die Phasenmessung im Vergleich zur Code-Messung eine um etwa zwei Zehnerpotenzen höhere Auflösung ergibt, lässt sich wegen der verwendeten Trägerwellenlängen Zentimetergenauigkeit – möglicherweise sogar darunter – erreichen (Abb. 14). Messgrösse ist also jetzt die Phase φ der in P empfangenen Welle zu einem bestimmten Zeitpunkt, bezogen auf die Empfängeruhr. Die Phasenlage φ hängt vom Abstand $s = |\mathbf{r}_S - \mathbf{r}_P|$ und von ΔT_P ab; es gilt

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} [|\mathbf{r}_S - \mathbf{r}_P| + c \Delta T_P - m\lambda]. \quad (2)$$

Wie bei allen Phasenmessungen ist die Grösse $m\lambda$, ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge λ , unbekannt. Diese Mehrdeutigkeit lässt sich bei einer a priori-Kenntnis der Koordinaten von P beseitigen. Meist wird man sich aber mit einer besonderen Messanordnung helfen: Beobachtet man die Signale eines Satelliten auf zwei Stationen A und B, so lässt sich mit (2) eine Beziehung für die Phasendifferenz $\varphi_B - \varphi_A$ gemäss

$$\varphi_B - \varphi_A = \frac{2\pi}{\lambda} [|\mathbf{r}_S - \mathbf{r}_B| - |\mathbf{r}_S - \mathbf{r}_A| - (m_B - m_A) \lambda + c (\Delta T_B - \Delta T_A)] \quad (3)$$

anschreiben. Auch (3) ist zunächst unbestimmt; verschiedene Lösungsansätze zeigen aber, dass das Problem lösbar ist, wenn Phasendifferenzen für mehrere Satellitenpositionen gemessen werden [3], [13], [42].

Je nach dem Lösungsansatz werden die in den Stationen A und B gemessenen oder die vorab gebildeten Phasendifferenzen als Beobachtungsgrössen angesehen. Obgleich sich bei der Lösung die Koordinaten der Stationen A und B ergeben, liegt das Hauptgewicht auf den Koordinatendifferenzen.

Hier ergibt sich übrigens schon eine Sprachverwirrung: Diese Methode wird gelegentlich als interferometrische Nutzung bezeichnet, was nicht richtig ist.

Will man die Rekonstruktion der Trägerwelle umgehen oder ist man mangels Kenntnis des P-Codes nicht dazu in der Lage, so hilft eine *Nutzung der GPS-Signale im Sinne der VLBI-Methode*: Man fasst die Signale als zufälliges Rauschen auf, zeichnet sie auf wenigstens zwei Stationen auf und erhält dann aus einer anschliessenden Überlagerung und Korrelation der registrierten Phasenströme den Laufzeitunterschied $\Delta\tau_{A \cdot B}$ zwischen den in den beiden Stationen ankommenden Signalen, woraus wieder der Basisvektor abgeleitet werden kann. Die Beobachtungsgleichung lautet dann

$$\Delta\tau_{A \cdot B} = \frac{s_B - s_A}{c} = \frac{|\mathbf{r}_S - \mathbf{r}_B| - |\mathbf{r}_S - \mathbf{r}_A|}{c} + (\Delta T_B - \Delta T_A). \quad (4)$$

(4) zeigt, dass auch bei der interferometrischen Methode die geozentrische Position \mathbf{r}_S des Satelliten nötig ist, wenngleich nicht Stationskoordinaten, sondern Koordinatendifferenzen bestimmt werden.

Eine Bewertung von GPS wäre unvollständig, würde ich nicht auch die *verfügbaren Instrumente* ansprechen. Nicht verwunderlich ist, dass sich die Gerätefirmen wegen des wesentlich grösseren Marktes überwiegend der Entwicklung von Navigationsgeräten angenommen haben und so für die Geodäsie nur wenig Geräte verfügbar sind. Eine ganz ähnliche Situation trifft man auch im Bereich der inertialen Vermessungssysteme an. Als erstes geodätisch konzipiertes GPS-Empfangssystem ist das *Macrometer 1000* zu nennen, das inzwischen erfolgreich erprobt wurde [4], [8]. Vom Funktionsprinzip her ist das Macrometersystem unter die Autokorrelationsverfahren einzuordnen. Vorteilhaft ist, dass ohne die Codes gearbeitet und die nach einem patentierten Spezialverfahren rekonstruierte Trägerwelle für eine Phasendifferenzmessung benützt werden kann.

Nachrichtentechniker sagen freilich, dass es sich von der Signalverarbeitung her um eine der kostspieligsten Lösungen handelt.

Nachteilig ist, dass das Gerät bisher nur mit der L1-Welle arbeitet, also eine Elimination der ionosphärischen und troposphärischen Einflüsse nicht möglich ist. Ein Zweifrequenzgerät ist aber in Vorbereitung.

Von den vorliegenden zahlreichen Erprobungen seien die seit 1983 in der Bundesrepublik Deutschland ausgeführten Macrometer-Kampagnen zu erwähnen, die grösstenteils von Landesvermessungsämtern in Auftrag gegeben wurden [31]. Die relativen Genauigkeiten liegen zwischen 1:200 000 und 1:500 000. Das bedeutet, dass man für kleinräumige Netze mit Seitenlängen von 5 bis 20 km Punktlage- und Höhenfehler von $\pm 1 \dots 2$ cm erreicht. Für Distanzen über 100 km ergeben sich relative Genauigkeiten von $\pm 2 \dots 5$ dm, also im Grunde kein Fortschritt gegenüber den Dopplermessungen im NNSS. – Wegen der Messung mit nur einer Frequenz sind die Ergebnisse m. E. ohnehin fragwürdig.

Kurz angesprochen sei auch die *Verarbeitung der Ergebnisse*. Wie schon erwähnt, erhält man Koordinatenunterschiede, also die Komponenten eines Basisvektors. Im einfachsten Fall kann man die Stationsvektoren zu einem räumlichen Netz zusammenfügen. Fehlertheoretisch günstiger ist eine gemeinsame Bearbeitung aller beobachteten Daten, d.h. eine Art Mehr-Stations-Lösung. – Auch dafür sind unterschiedliche Ansätze denkbar, z.B. mit fest vorgegebenen Bahnparametern oder mit Verbesserung spezieller Bahnparameter im Sinne einer sog. short-arc-Lösung.

Bleibt noch die wichtige Frage: Wie kann ein so aufgebautes räumliches Netz mit den klassischen Landesvermessungswerken, die durch getrennt bearbeitete Lage- und Höhenetze gekennzeichnet sind, verbunden werden? Den Schlüssel zur Lösung liefern die Modelle der dreidimensionalen Netzbeziehung [45]. Natürlich wird man dabei je nach Aufgabenstellung unterschiedlich vorgehen haben, d.h. je nachdem, ob die Überprüfung eines bestehenden Grundlagnetzes oder die Neuvermessung kleinerer Netzteile beabsichtigt ist.

Ich schliesse die Bewertung der Macrometer-Messung mit zwei Hinweisen ab: Der *Einsatz in der Landesvermessung* hängt für grössere Distanzen wesentlich von der Genauigkeit der verfügbaren Bahnparametern ab. Dies bedeutet, dass man einen Beobachtungsdienst zur Bestimmung präziser Satellitenephemeriden einzurichten hat. – Dies gilt auch für die *Anwendung in der Geodynamik*: Um zu relativen Genauigkeiten von $1 \cdot 10^{-7}$ vorzustossen, d.h. auf 100 km etwa den Zentimeter zu erreichen, ist eine Beobachtung auf beiden Trägerfrequenzen unerlässlich.

Ein Gerät, das alle geodätisch interessanten Informationen liefert, ist das erstmals 1980 vorgestellte Empfangssystem *TI4100 Navstar Navigator* der Firma Texas Instruments, das auf beiden Trägerwellen L1 und L2 Entfernung und Entfernungsänderungen und auch die Trägerphase präzise messen lässt [17], [33].

Es handelt sich um einen sog. Multiplex-Empfänger, der es erlaubt, innerhalb von 20 msec zwischen vier Satelliten umzuschalten. Da alle Messungen durch denselben Empfangskanal erfolgen, werden systematische Fehler zwischen den Kanälen vermieden. – Aus der Sicht der Nachrichtentechnik ist das Gerät als Kreuzkorrelationsempfänger einzustufen.

Nachteilig ist, dass die Kenntnis der Codes erforderlich ist, um die vom Satelliten gesendeten Signale zu decodieren.

Offiziösen Mitteilungen zufolge ist beabsichtigt, wenigstens den C/A-Code für die zivile Nutzung freizugeben. Um auch einen Zugriff zur Trägerwelle L2 zu erhalten, die zur Zeit nur mit dem P-Code moduliert ist, werden bereits Lösungen erarbeitet.

Das Gerät ist aber universell einsetzbar, weil es sowohl für die Einzelpunktpositionierung als auch für die Differentialmethode geeignet ist und überdies einen Zugang zu den Satellitenephemeriden ermöglicht. Leider ist der Preis des Gerätes hoch, ich meine zu hoch. Es ist zu hoffen, dass die in Entwicklung befindlichen Geräte, wie z.B. *Wild-Magnavox WM 101* (vgl. [39]) sowie der verstärkte Einsatz der Digitaltechnik, zu einer günstigeren Preisentwicklung führen möchten.

Ohne Zweifel wird GPS bei der Lösung verschiedener geodätischer Aufgaben sehr hilfreich sein. Bis zum vollen Erfolg ist aber noch erhebliche Entwicklungs- und Erprobungsarbeit zu leisten. Nicht teilen kann ich die gelegentlich sehr euphorischen Vorstellungen über GPS: Ich meine, dass GPS-Beobachtungen z.B. bei der Netzergänzung immer dann sinnvoll sind, wenn das Gelände Richtungs- und Entfernungsmessungen nicht oder nur mit Hilfe kostspieliger Signalbauten zulässt. Ich glaube aber nicht, dass Theodolite und elektromagnetische Distanzmessgeräte in nächster Zeit in den Speichern verschwinden werden.

Im Zusammenhang mit GPS ist noch das Thema der *Erdrotationsparameter* aufzugreifen: Positionierungsverfahren mit Hilfe von Satelliten lassen sich für die Landesvermessung und die Geodynamik nur dann nutzen, wenn die Bewegung der Erdrotationsachse genau bekannt ist (Abb. 15). Die Satellitenbahnen, bestimmt als Lösungen von Bewegungsgleichungen, gelten in einem raumfesten System (blau) und müssen in ein erdfestes System (rot), festgelegt durch den Conventional International Origin CIO, transformiert werden. Dafür braucht man genaue Erdrotationsparameter, d.h. die Koordinaten X_p , Y_p des Momentanpols und die Phase der Erdrotation, dargestellt durch UT1 - UTC. Diese Parameter wurden bisher aus astronomischen Breiten- und Zeitbestimmungen abgeleitet. Für die Satellitenlösungen werden die Erdrotationsparameter sehr viel genauer benötigt, und man hat daher versucht, für ihre Bestimmung geodätische Raumverfahren einzusetzen. Geeignet sind sowohl Laserentfernungsmessungen nach Satelliten als auch VLBI-Beobachtungen [6], [41]. Beide Verfahren liefern, wie die Ergebnisse der Beobachtungskampagne MERIT (*Monitoring Earth Rotation and Intercomparison of Techniques of Observations and Analysis*) zeigen, hervorragende Resultate, die überdies gut übereinstimmen. – Dementsprechend wurde vorgeschlagen, ab 1988

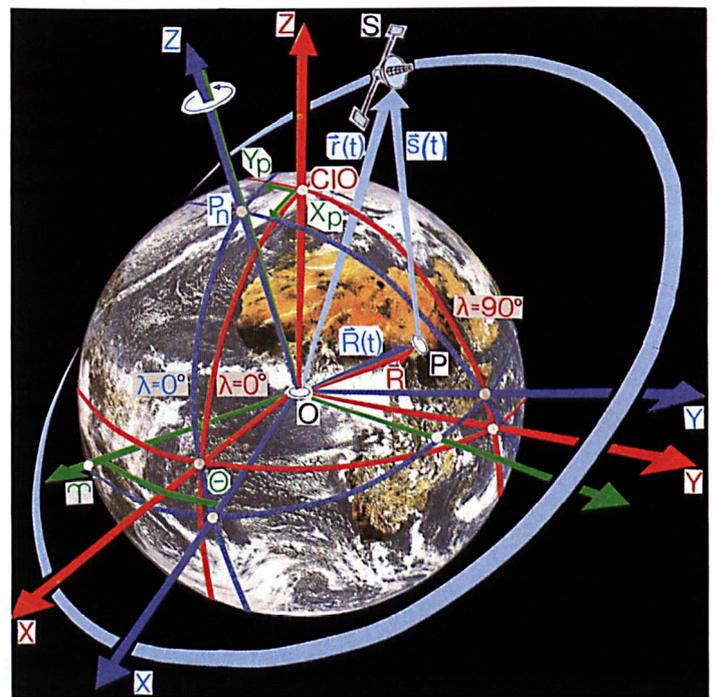


Abb. 15: Erdrotationsparameter für die Transformation von Satellitenbahnen vom raumfesten System in das erdfeste System.

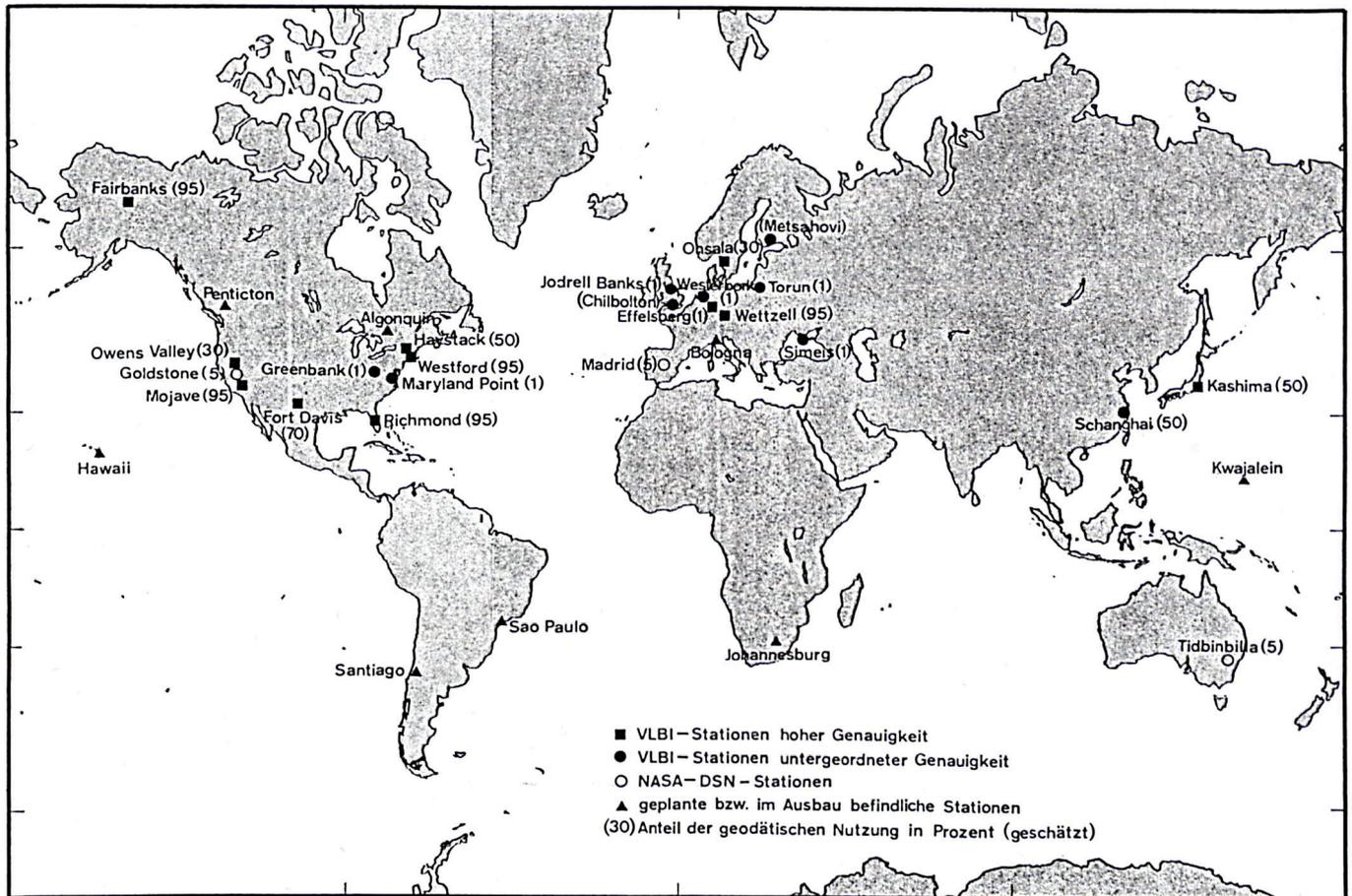


Abb. 16: Operationelle und geplante stationäre Radioteleskope für VLBI-Beobachtungen (Stand Juli 1984).

einen *neuen Erdrotationsdienst*, basierend auf diesen Beobachtungen, aufzubauen. – Unsere Fundamentalstation Wettzell wird sich als Observatorium daran beteiligen; auch eine Mitwirkung bei der Datenanalyse ist vorgesehen. – Warum erwähne ich das? Ich möchte damit die gelegentlich in der Praxis anzutreffende Meinung, Fundamentalstationen hätten nichts mehr mit der praktischen Geodäsie zu tun, widerlegen.

Wie schon erwähnt, liefert die VLBI-Methode neben Erdrotationsparametern auch *Basislinien hoher Genauigkeit*: Die 920-km-Distanz zwischen Wettzell/Bayerischer Wald und Onsala/Schweden ist mit einer reproduzierbaren Genauigkeit von wenigen Millimetern bestimmt; die Genauigkeit der etwa 6000 km grossen Distanz zwischen Wettzell und Westford/USA beträgt etwa ± 2 cm. – Es ist noch zu früh, daraus Kontinentalbewegungen abzuleiten.

Die Genauigkeit dürfte sich durch eine bessere Erfassung der atmosphärischen Laufzeitverzögerungen noch steigern lassen. Dies wird durch Einsatz eines sog. Wasserdampfradiometers möglich werden, das derzeit entwickelt und erprobt wird.

Die aus VLBI abgeleiteten Basislinien können wegen der geringen Zahl von Stationen nicht unmittelbar für die Landesvermessung genutzt werden (Abb. 16). Es wäre aber nützlich, aus VLBI-Beobachtungen – denkbar wäre z. B. ein Dreieck Wettzell/Onsala/Madrid – Massstab und Orientierung des Europäischen Dreiecksnetzes sehr genau festzulegen. – VLBI-Beobachtungen werden übrigens auch für das Nordamerikanische Datumsnetz (NAD) genutzt.

Ob es gelingt, für geodynamische Projekte in Europa *transportable Radioteleskope* einzusetzen, lässt sich heute noch nicht beurteilen.

Die VLBI-Ergebnisse zeigen übrigens sehr eindrucksvoll auch den ungeheuren Fortschritt der Geodäsie: Anfang der fünfziger Jahre hatte ich an einer Sonnenfinsternis-Expedition teilgenommen, um eine interkontinentale Entfernung auf etwa ± 100 m genau zu bestimmen. Heute gelingt dies auf wenige Zentimeter genau. Die Genauigkeit konnte hier in 30 Jahren um den Faktor 10^4 gesteigert werden!

Schliesslich ist noch die *Laserentfernungsmessung zum Mond* zu bewerten. – Auf den Informationsgehalt dieser Beobachtungen wurde schon hingewiesen. Die grosse Bedeutung der LLR-Methode liegt meines Erachtens darin, die aus Satellitenbeobachtungen und aus VLBI-Ergebnissen gewonnenen Erdrotationsparameter und Basislinien zu überprüfen. Unmittelbaren Nutzen bringt die LLR-Methode also der Geodynamik, mittelbar über die genaue Bestimmung von Erdrotationsparametern aber auch der Landesvermessung.

Neben der schon erwähnten instrumentellen Vorbereitung der Laserentfernungsmessung zum Mond haben wir am Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie der TU München mit theoretischen Arbeiten zur genauen Ephemeridenrechnung des Mondes und zur Parameterschätzung im Erde-Mond-System begonnen [9], [11].

4. Auswirkungen auf das Berufsbild und die Ausbildung der Vermessungsingenieure

Im Jahre 1948 hatte ich an der damaligen Technischen Hochschule München eine Wahlvorlesung über «Ausgewählte Kapitel aus der Geophysik» besucht. Der Dozent meinte damals, die Geodäsie hätte für viele Bereiche, so auch für die Geophysik, wichtige Dienstleistungen zu erbringen, nämlich Positionen, Höhen und Karten bereitzustellen. Dies war sicher eine gutgemeinte, aber völlig unzureichende Bewertung. Wie sieht es heute mit der Bedeutung und Anerkennung unserer Arbeit aus? Weitgehend bekannt ist inzwischen, dass eine moderne Gesellschaft ohne die vielfältigen Dienstleistungen des Vermessungsingenieurs nicht auskommt.

Weit weniger bekannt ist, dass geodätische Ergebnisse oftmals die Basis für die Forschung in benachbarten Disziplinen bilden. Seit langer Zeit besteht eine enge Zusammenarbeit mit der *Geophysik*. Seit die Geodäsie auch Beiträge zur globalen Geodynamik liefert, ist dieser Kontakt noch verstärkt worden. – Auch die Standard-Erden mit ihren globalen Schwerfeldbestimmungen sind für die Geophysik bei der Erstellung von Erdmodellen von grosser Bedeutung. – Auch für die *Weltraumtechnik* sind geodätische Ergebnisse unerlässlich: Das äussere Schwerfeld wird benötigt für die Vorhersage und die Bestimmung der Flugbahnen von Satelliten und Raumfahrzeugen, und geozentrische Koordinaten sind nötig für die Trackingstationen zur Beobachtung von Raumfahrzeugen. – Eng war und ist die Zusammenarbeit mit der *Astronomie*. Neu belebt wurde diese durch die Nutzung der Radioastronomie in beiden Disziplinen. Ein weiteres Bindeglied ist die Himmelsmechanik, und die Laserentfernungsmessungen zum Mond werden die Kontakte weiter verstärken. – Auch mit der *Ozeanographie* teilt die Geodäsie gemeinsame Interessen, insbesondere seit der Nutzung der Satellitenaltimetrie. Beide Disziplinen sind an der Meerestopographie bzw. der zugehörigen Äquipotentialfläche interessiert. – Diese Fragen spielen übrigens eine fundamentale Rolle bei der Errichtung eines globalen Höhendatums [19]. Ich möchte die interdisziplinären Verflechtungen der Geodäsie nicht weiterführen, sondern nur darauf hinweisen, dass die Geodäsie aus dieser interdisziplinären Zusammenarbeit in hohem Masse profitiert.

Ja, man fragt sich manchmal, warum die Öffentlichkeit so wenig über die *Arbeit der Geodäten* weiss. Ein Grund ist sicherlich, dass die Bedeutung der Vermessungsarbeiten für Aussenstehende oftmals nicht erkennbar ist, weil das Gesamtvorhaben, dem sie dienen, z.B. ein grosses Ingenieurbauwerk, viel augenfälliger ist. Ein zweiter Grund ist – Carl Fridolin Baeschlin pflegte gern darauf hinzuweisen –, dass zum Verständnis der geodätischen Wissenschaft anspruchsvolle mathematische und physikalische Kenntnisse nötig sind. Ein dritter Grund, der Ingenieur- und Naturwissenschaften in gleicher Weise betrifft, ist die Orientierung der Gesellschaft am humanistischen Bildungsideal, das den Bildungswert von Technik und Naturwissenschaft weitgehend ignoriert. Ich füge sogleich an, ich bin nicht gegen den Humanismus, wehre mich aber gegen seine Einseitigkeit.

In engem Zusammenhang damit steht auch die *gesellschaftliche Stellung des Geodäten* und ganz allgemein des Ingenieurs. 35 Berufsjahre haben mit gezeigt, dass der Ingenieur in der Gesellschaft trotz seiner schwierigen und verantwortungsvollen Arbeit weniger Ansehen geniesst als andere akademische Berufe. – Der Wiener Mathematiker Wilfried Nöbauer hat dies im April 1985 beim Österreichischen Verein für Vermessungswesen und Photogrammetrie zu analysieren versucht [24]: Man sieht den Ingenieur als einseitig gebildet und unselbständig an, hält ihn im Berufsleben für ein ausführendes Organ, traut ihm mangels rhetorischer und dialektischer Kenntnisse weniger Diskussionsfähigkeit und Durchsetzungsvermögen zu und hält ihn schliesslich für Führungsaufgaben wenig befähigt. Das mag etwas überzeichnet sein, trifft aber im Grunde die Situation. In der Tat erfordern Studium und Berufsarbeit beim Ingenieur eine intensive Hinwendung an die Arbeit, nicht zuletzt wegen des ungeheuer raschen Fortschrittes. So besteht für den Ingenieur die Gefahr, dass ihm Zeit und Kraft fehlen, sich auch anderen Bereichen zu widmen.

Die kritischen Aussagen zu diesem Thema gehen manchmal noch weiter: In Wirtschaft und Verwaltung ist man gelegentlich sogar mit der fachlichen Ausbildung der Ingenieure unzufrieden. Was ist zu tun? Ich beschränke mich auf einige Vorschläge für die *universitäre Ausbildung der Vermessungsingenieure* [38]. Die Fortschreibung der Studienpläne in enger Fühlungnahme mit der Praxis wird von den Universitäten sehr ernst genommen. Und doch ist das Ergebnis unbefriedigend. Warum? Ich skizziere als Beispiel die Situation an der TU München: Seit langer Zeit ist das Studium der Geodäsie reglementiert, d.h. es ist vorgeschrieben, wann, wo und bei wem der Student etwas zu hören hat; das geht vermutlich nicht anders. Darüber hinaus ist das Studium fachlich abgegrenzt; dies ist nicht gewollt, wegen der übervollen Studienpläne aber nahezu unvermeidbar. Um den neuen Arbeits- und Wissensgebieten gerecht zu werden, hat man Anfang der siebziger Jahre Vertiefungsrichtungen eingeführt. Ziele dieser Lösung waren, das Studium nicht zu verlängern, eine Aufsplitterung unseres kleinen Berufsstandes zu vermeiden und den Absolventen alle Bereiche des Berufslebens zu erhalten, auch die Forschung in der Geodäsie. – Der Einsatz geodätischer Raumverfahren in Wissenschaft und Praxis wird eine neuerliche Änderung der Studienpläne erfordern: Sollen unsere Absolventen bei Satellitenmethoden, bei der Fernerkundung oder der digitalen Bildverarbeitung, um nur einige der neuen Technologien zu nennen, nicht zu «Black-Box-Benutzern» werden, müssen die mathematisch-naturwissenschaftlichen Grundlagen verstärkt werden. Zumindest wird zusätzlich eine anwendungsorientierte Informatik nötig sein. Nur dann wird der Vermessungsingenieur in der Lage sein, z.B. auch bei der Errichtung von Landinformationssystemen federführend mitzuarbeiten, eine Aufgabe, die man nicht dem Informatiker überlassen darf, weil dieser sie nicht befriedigend lösen kann. – Um bei unveränderter Studiendauer noch neue Gegenstände aufzunehmen, sehe ich nur die Möglichkeit, kurzlebige Informationen auszusondern und einem längerlebigen Grundwissen Platz zu schaffen. Noch wichtiger ist, den Studierenden eine Lernfähigkeit zu vermitteln, so dass

sie noch Jahre nach dem Examen zu einer Innovation fähig sind. – Zum anderen sollten Wirtschaft und Verwaltung den jungen Diplomingenieuren eine Einarbeitungszeit gewähren, statt darüber zu klagen, unsere Absolventen seien nicht optimal auf die Praxis vorbereitet. Ich gehe noch weiter und wage einen ketzerischen Vorschlag: Verwaltung und Wirtschaft sollten die jungen Diplomingenieure im administrativen und juristischen Bereich aus- bzw. fortbilden und auch Kenntnisse in Management und Führungstechnik vermitteln. Letztere Gegenstände können nämlich an der Hochschule nur theoretisch gelehrt werden und sollten ohnehin erst nach einigen Jahren Berufserfahrung vermittelt werden.

Ratlos bin ich hinsichtlich der Vermittlung einer soliden Allgemeinbildung. Eine Verordnung per Studienplan bringt sicherlich keinen Erfolg. Leider stehen – zumindest in der Bundesrepublik Deutschland – die Studenten unter einem teilweise selbstverschuldeten Stress: Während meiner Studienzzeit gab es trotz schwieriger äusserer Umstände von Montag bis Samstag Vorlesungen und damit auch Zeit für andere, nicht fachbezogene Lehrveranstaltungen. Heute ist es kaum noch möglich, an einem Freitag nachmittag eine Lehrveranstaltung abzuhalten. Die auf Freizeit gerichtete Denkungsart der Wohlstandsgesellschaft wirkt sich inzwischen auf das Studium an den Universitäten aus.

5. Ausblick

Bei einer Union Lecture anlässlich der IUGG-Generalversammlung 1975 in Grenoble meinte King-Hele, für die Geodäsie hätte das Goldene Zeitalter begonnen. Wertet man die neuen technischen Möglichkeiten als Chance und Herausforderung zugleich, so dürfte dies zutreffen. Freilich ist dafür gesorgt, dass die Bäume nicht in den Himmel wachsen. Wie schon eingangs erwähnt, wird der wissenschaftliche und technische Fortschritt zumindest von Teilen der Gesellschaft mit Skepsis verfolgt. Auch die Weiterentwicklung der Geodäsie wird sich daher in einem gewissen Spannungsfeld vollziehen.

Die *Skepsis gegenüber dem Fortschritt* ist ein komplexer Bereich, der in letzter Zeit des öfteren analysiert wurde. Einige Ursachen glaubt man zu kennen [23], [43]. Einmal sind es die durch die Technik geschaffenen Probleme wie Umweltbelastung, technologisch bedingte Arbeitslosigkeit und rücksichtsloser Verbrauch der Rohstoffe. Zum anderen handelt es sich um eine Kritik an den Wertvorstellungen unserer Industriekultur schlechthin. Diese Kritik hat viele Seiten; besonders angegriffen werden das Leistungsprinzip, die Rationalität und die Notwendigkeit des Fortschrittes insgesamt. Ich möchte noch einen persönlichen Eindruck anfügen: Viele junge Menschen empfinden eine gewisse Ohnmacht gegenüber der ungeheuren Zunahme des Wissens.

Verständlich sind die Ängste und Sorgen vieler Menschen im Zusammenhang mit der Rüstung in aller Welt. Auch wenn wir die zerstörende Gewalt moderner Waffensysteme nur ahnen, verstehen wir doch den Erzähler der Märchen aus 1001 Nacht, der da meinte, die Erde und die Tiere hätten gezittert an dem Tag, an dem Gott den Menschen erschuf. Es ist nicht verwunderlich, dass einige Bereiche des technischen Fortschrittes nicht nur von Sektierern, sondern auch von Natur-

wissenschaftlern und Technikern sehr kritisch beurteilt werden. In Diskussionen wird oftmals auch deutlich, dass bei der Beurteilung von Forschungsprojekten das Kriterium «Qualität» allein nicht mehr ausreicht, sondern dass zu prüfen ist, ob und wie durch ein Forschungsergebnis die Welt verändert wird und ob dadurch nicht mehr Probleme geschaffen als gelöst werden.

Auch wenn wir Geodäten uns mit der Forschungsarbeit in einem weniger kritischen Bereich bewegen – gelegentlich werden freilich die genauen Positionierungsmethoden als Beitrag zur Kriegstechnik gewertet, und GPS hat man schon in Verbindung mit dem «Krieg der Sterne» genannt –, macht dies alles doch nachdenklich.

Ich meine aber, Angst ist ein schlechter Ratgeber. Aufklärung ist nötig, um das Vertrauen in die Technik wiederherzustellen, weil wir nur so die durch die Technik geschaffenen Probleme lösen können. Freilich müssen alle Verantwortlichen in Wissenschaft, Politik und Gesellschaft dazu beitragen, einen Missbrauch des Fortschrittes zu verhindern.

Noch eine andere Sorge ist anzusprechen: Mitunter wird in der Öffentlichkeit gefragt, ob es sinnvoll sei, sich an Projekten der Weltraumforschung zu beteiligen. Ich meine, es war nicht nur aus wissenschaftlichen, sondern auch aus politischen und wirtschaftlichen Gründen richtig, für nationale und europäische Projekte erhebliche Mittel einzusetzen [22]. Bedauerlich ist, dass man bei der Mittelverteilung für die verschiedenen Disziplinen recht unterschiedliche Massstäbe ansetzt: Die Erfolge der Astrophysik bei der Erforschung benachbarter Planeten werden trotz der hohen Kosten bestaunt und bejubelt. Weit zurückhaltender ist man bei der finanziellen Förderung erdorientierter Raumtechniken. Man vergisst offenbar, dass die Erde, auf der wir leben, auch ein Planet ist, der noch gründlich zu erforschen ist, wofür auch Raumverfahren unerlässlich sind. Schliesslich bestimmen wir ja nicht nur bessere Figur- und Feldparameter der Erde, sondern tragen auch zum Verständnis der komplizierten Vorgänge in der Erdkruste bei. Es ist heute keine Utopie mehr, tektonische Bewegungen nachzuweisen. Auch könnte es mit Hilfe operationeller Systeme gelingen, erdbebengefährdete Gebiete nicht nur zu überwachen, sondern eines Tages durch eine Vorhersage sogar zu warnen. Dass die Ergebnisse des Geodäten für die Lösung vieler Aufgaben in Staat und Gesellschaft unentbehrlich sind, habe ich schon betont. Mit Recht dürfen wir Geodäten also sagen, dass unsere Arbeit nicht nur der wissenschaftlichen Erkenntnis, sondern in hohem Mass auch humanitären Zielen dient.

Literatur (Auswahl)

- [1] Anderle, R.J., Malyevac, C.A.: Plate Motions Computed from Doppler Satellite Observations, Proc. of the Intern. Symp. on the Use of Artif. Sat. for Geod. and Geodyn., Athens, Greece 1984 (Ed. G. Veis), Vol. III, S. 506–528
- [2] Bauersima, I.: NAVSTAR/Global Positioning System (GPS), I, II, III, Mitt. d. Sat. Beob. Station Zimmerwald, Nr. 9/1982, 10/1983, 12/1983
- [3] Beutler, G. et al.: Some Theoretical and Practical Aspects of Geodetic Positioning Using Carrier Phase Difference Observations of GPS-Satellites, Mitt. d. Sat. Beob. Station Zimmerwald, Nr. 14, 1984
- [4] Bock, Y. et al.: Geodetic Accuracy of the Macrometer Model V-1000, Bull. Géod., Vol. 58, 1984, S. 211–221
- [5] Bossler, J.D.: The Impact of VLBI and GPS on Geodesy, EOS, Vol. 64, 1983, S. 569f.
- [6] Campell, J., Witte, B.: Grundlagen und geodätische Anwendung der Very Long Baseline Interferometry (VLBI), Zeitschr. Verm. Wesen, 1978, S. 10–20
- [7] Campell, J.: Grundlagen zur Nutzung des Global Positioning System (GPS) in der Landesvermessung, Zeitschr. Verm. Wesen, 1986, S. 19–23
- [8] Counselman, C.C., Steinbrecher, D.H.: The Macrometer: A Compact Radio Interferometric Terminal for Geodesy with GPS, Proc. 3rd Intern. Geod. Symp. Satellite Doppler Positioning, Las Cruces, USA, 1982, S. 1165f
- [9] Egger, D.: Systemanalyse der Laserentfernungsmessung, Veröff. Deutsche Geod. Komm., Reihe C, Heft Nr. 311, München 1985
- [10] Ehrnsperger, W.: Final Report on the West European Satellite Triangulation WEST, Veröff. Bayer. Komm. f. d. Intern. Erdmessung, Astron.-Geod. Arbeiten, Heft Nr. 37, München 1978
- [11] Gleixner, H.: Ein Beitrag zur Ephemeridenrechnung und Parameterschätzung im Erde-Mond-System, Veröff. Deutsche Geod. Komm., Reihe C, Heft Nr. 319, München 1986
- [12] Goad, C.C., Remondi, B.W.: Initial Relative Positioning Results Using the Global Positioning System, Bull. Géod., Vol. 58, No. 2, 1984, S. 193–210
- [13] Gurtner, W., Beutler, G., Bauersima, I., Schildknecht, T.: Evaluation of GPS Carrier Phase Difference Observations, the Bernese Second Generation Software Package, Proceedings of the First Intern. Symp. on Precise Positioning with GPS, Rockville/Maryland, 1985, S. 363–372
- [14] Hartl, Ph. et al.: GPS-Technology and Methodology for Geodetic Application, Proc. Inertial, Doppler and GPS Measurements for National and Engineering Surveys, Schriftenreihe Univ. Stud. Verm. Wesen, Heft 20–1, Uni Bw, München, 1985, S. 209–226
- [15] Heckmann, B.: Über die Auswirkung von relativistischen Effekten auf geodätische Messungen, Allg. Verm. Nachr. 1985, S. 329–336
- [16] Helmert, F.R.: Die mathematischen und physikalischen Theorien der höheren Geodäsie, Teubner Verlag, Leipzig 1880/1884. Reprint: Minerva GmbH, Frankfurt a. M., 1962
- [17] Henson, D.J. et al.: Geodetic Applications of the Texas Instruments TI 4100 GPS-Navigator, wie [14], Heft 20–2, München 1985, S. 405–423
- [18] Ilk, K.H.: On the Regional Mapping of Gravitation with Two Satellites, Proc. of the I. Hotine-Marussi-Symp. on Math. Geod., Milano 1986, S. 807–831
- [19] Kelm, R.: Vertical Datum Definitions Discussed in View of European Vertical and Horizontal Networks, Proc. Third Intern. Symp. on the North American Vertical Datum, Rockville 1985, S. 95–104
- [20] Kobold, F.: Hundert Jahre Schweizerische Geodätische Kommission, Festschrift, Zürich 1962
- [21] Kobold, F.: Die Schweizerische Geodätische Kommission. Zum hundertjährigen Bestehen, Zürich 1962
- [22] Lüst, R.: Raumfahrt, eine nationale und europäische Aufgabe, DFVLR-Nachrichten 47, März 1986, S. 6–10
- [23] Maier, H.: Lebenserwartungen der Industriekultur, Jahrbuch der TU München, München 1985, S. 75–83
- [24] Nöbauer, W.: Gedanken zu einem zeitgemässen Technikstudium, Österr. Zeitschr. Verm. Wes. u. Photogramm., 73. Jahrgang 1985, S. 184–189
- [25] Preuss, E.: Radiointerferometrie mit grossen Basislängen (VLBI), Physik in unserer Zeit, 1985, S. 123–130
- [26] Rapp, R.H.: Detailed Gravity Anomalies and Sea Surface Heights Derived from GEOS-3/SEASAT Altimeter Data, Dep. of Geod. Science and Surveying, OSU, Rep. No. 365, Columbus, Ohio, 1985
- [27] Reigber, C. et al.: GRIM Gravity Model Improvement Using LAGEOS (GRIM 3-L1), Journ. Geoph. Res., Vol. 90, 1985, S. 9285–9299
- [28] Reinhart, E. et al.: Das mobile Satellitenlaserentfernungsmesssystem MTLRS-1, Systembeschreibung, Einsatzplanung und erste Erfahrungen, Allg. Verm. Nachr. 1985, S. 487–503
- [29] Rummel, R.: Satellitengradiometrie, Zeitschr. Verm. Wesen, 1985, S. 242–252
- [30] Schmid, H.: Worldwide Geometric Satellite Triangulation, Geod. Res. and Development Lab., National Ocean Survey, USA, 1973
- [31] Schmidt, R.: Praktischer Einsatz des Macrometers in der Landesvermessung – Ergebnisse und Ausblick –, Zeitschr. Verm. Wesen 1986, S. 15–18
- [32] Schneider, M. et al.: Status Report on the new Radiotelescope for the Wettzell station, in: Techniques d'Interférométrie a très grande Base, CNES-Publ. 1982
- [33] Seeber, G.: Die Rolle des NAVSTAR Global Positioning Systems für die Lösung geodätischer Aufgaben, Zeitschr. Verm. Wesen 1984, S. 1–11
- [34] Seeger, H., Schlüter, W., Wilson, P.: Doppler Activities in Europe, AVN, International Supplement, No. 1, 1984, S. 19–29
- [35] Sigl, R.: The Satellite Observation Station Wettzell of the Sonderforschungsbereich 78 Satellitengeodäsie (SFB 78) as a Geodynamic Fundamental Station, AVN, International Supplement, No. 1, 1984, S. 3–16
- [36] Sigl, R.: The Contribution of Satellite Geodesy to the Geosciences, GeoJournal 1984, S. 341–362
- [37] Sigl, R.: The Contribution of Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut (DGFI) to the WEGENER/MEDLAS-Project, Beitrag zur Festschrift Antal Tarczy-Hornoch 85, in: Geodetic and Geophysical Research Institute of the Hungarian Academy of Sciences, Sopron 1985, S. 33–40
- [38] Sigl, R.: Einige Gedanken zur universitären Ausbildung von Vermessungsingenieuren, Festschrift Prof. Eichhorn zum 60. Geburtstag, Darmstadt 1985, S. 265–272
- [39] Stansell, T.A. et al.: The First Wild Magnavox WM-101. Proc. First Intern. Symp. on Precise Positioning with GPS, Rockville, US Dept. of Commerce, 1985, S. 147–160
- [40] Strauss, R.: Das Global Positioning System (GPS) und seine möglichen Auswirkungen auf die Landesvermessung, Mitt. DVW Hessen, 1986, Heft 2, S. 12–26
- [41] Tapley, B.D. et al.: Station Coordinates, Baseline and Earth Rotation from LAGEOS Laser Ranging 1976–1984, Journ. Geoph. Res., Vol. 90, No. B 11, 1985, S. 9235–9248
- [42] Wells, D.E. et al.: The Comparative Accuracies of Global Positioning System Differential Positioning Modes (Paper), XVIII. Gen. Versamml. der IUGG, Hamburg 1983
- [43] Wild, W.: Das gestörte Vertrauen in die Technologie, ARAL Journal, Ausgabe Herbst 1985, S. 16–25
- [44] Wilson, P., Aardom, L.: Satellite Laser Ranging to Measure Crustal Motion in the Eastern Mediterranean, CSTG-Bull. Nr. 7, 1984, S. 227–233
- [45] Wolf, H.: Möglichkeiten zur Gestaltung geodätischer Netze mit GPS-Messungen, Zeitschr. Verm. Wesen 1986, S. 397–405

Beitrag der Geodäsie zur Geodynamik*

von Hans-Gert Kahle

Zusammenfassung

Die Geodäsie unterliegt gegenwärtig einem bedeutungsvollen Wandel. Neue satellitengestützte Navigationsverfahren ermöglichen leistungsfähige Messmethoden, die sich auch in der Praxis der Landesvermessung durchsetzen werden. In der SGK wurden kürzlich die Weichen dafür gestellt, die schweizerischen geodätischen Aktivitäten den raschen internationalen Entwicklungen der Satelliten- und Weltraumgeodäsie anzupassen. Aktive Teilnahme von SGK-Mitgliedern an internationalen Satelliten-Projekten (GEOS-C, TRANSIT, LAGEOS, GPS) sowie Mitwirkung in Planungsgremien der NASA, der ESA und des Europarates gewährleisten gute Voraussetzungen für die Realisierung dieses Ziels.

Die wichtigste Entwicklung auf dem Gebiet der Satellitengeodäsie, das NAVSTAR Global Positioning System (GPS) der U.S.A., befindet sich im Endstadium der Entwicklungsphase. Gleichzeitig hat der definitive Systemaufbau begonnen, der ca. 1992 durch die operationelle Phase abgelöst werden soll. Bereits jetzt zeichnet sich mit den GPS-Testsatelliten die hohe Qualität des GPS in Bezug auf Allwettertauglichkeit, Messgeschwindigkeit und -Genauigkeit der weltweit möglichen Positionsbestimmung ab. Dadurch wird eine bisher nicht erreichte Vielfalt von Anwendungen erschlossen. Mit den neuen Methoden können fast beliebige Positionierungsaufgaben gelöst werden, angefangen bei hochdynamischen Problemen (Fahrzeugpositionierung, Flugzeugnavigation, Luftraumüberwachung) bis hin zu Messungen höchster Präzision, wie sie insbesondere in der Geodynamik und in der Erdbebenforschung erforderlich sind.

Die Planung der SGK für die nächsten Jahre zielt darauf ab, an dieser umwälzenden Entwicklung in internationaler Zusammenarbeit aktiv mitzuwirken. Eine intensive Mitarbeit von SGK-Mitgliedern ist seit längerem in der Internationalen Assoziation für Geodäsie (IAG) verwirklicht, in deren Sektionen, Kommissionen und Studiengruppen SGK-Mitglieder aktiv mitwirken. Diese Tradition geht weit zurück auf die Gründungszeit vor 125 Jahren, als die SGK unter der damaligen Leitung ihres Ehrenpräsidenten, General Dufour, im Auftrag des Schweizerischen Bundesrates der «Mitteleuropäischen Gradmessung» beitrug.

Der folgende Aufsatz gibt einen Überblick über die laufenden Aktivitäten der SGK, die sich in zunehmendem Mass mit der Vermessung von rezenten Erdkrustenbewegungen im alpinen Bereich beschäftigt und damit einen Beitrag zur Erforschung der aktuellen Geodynamik leisten kann.

1. Einleitung

Die Geodäsie ist in den letzten Jahren immer stärker in den Brennpunkt geodynamischer Fragestellungen gerückt. Wenn man früher, der Definition von Helmert folgend, die Geodäsie als «Wissenschaft von der Ausmessung und Abbildung der Erdoberfläche» definierte, so sind heute zusätzlich die Vermessung von rezenten Krustenbewegungen sowie die Bestimmung des anomalen Schwerepotentials hinzugekommen. Damit verknüpft die moderne Geodäsie Ingenieur- und Erdwissenschaften interdisziplinär. Mit der Aufgabe der Brückenbildung zwischen der Vermessungstechnik/Landesvermessung einerseits und den Naturwissenschaften andererseits rastet die Geodäsie in eine weltweite Neuentwicklung der Erdforschung ein, die sich mit aktuellen Problemen, wie z.B.

* Aktualisierte Version des Vortrages, gehalten am 12. September 1986.

Résumé

D'ores et déjà, la géodésie se voit soumise à d'importants changements. Les nouvelles méthodes de navigation par satellites assurent une bonne performance aux méthodes de mensuration qui s'imposent aussi au niveau de la mensuration nationale. La CGS s'est récemment efforcée, selon ses possibilités, d'adapter le niveau des activités géodésiques suisses au développement international très rapide dans le domaine de la géodésie spatiale et par satellites. Sa participation active aux projets internationaux de satellites (GEOS-C, TRANSIT, LAGEOS, GPS) ainsi qu'aux différentes commissions de planification organisées par la NASA, l'ESA et par le Conseil de l'Europe constitue un avantage important pour atteindre ce but.

Le progrès le plus important dans le domaine de la géodésie par satellites, le système NAVSTAR/GPS (Global Positioning System) développé aux Etats-Unis, touche au terme de sa phase de développement. Parallèlement, la mise en œuvre définitive a commencé; elle sera suivie de la phase opérationnelle aux alentours de 1992. Les satellites-test GPS ont déjà fait preuve de hautes qualités sur le plan de la disponibilité par tous les temps, de la rapidité d'exécution et de la précision possible du positionnement mondial. Ces nouvelles méthodes offrent ainsi de multiples possibilités d'emplois inconnues jusqu'ici. Elles permettent la solution de presque tous les problèmes de positionnement, en commençant par les problèmes de grande vitesse (positionnement des véhicules, navigation aérienne, surveillance de l'espace aérien) jusqu'à la mesure de grande précision, facteurs essentiels en particulier dans le domaine de la géodynamique et dans celui de la recherche sur les tremblements de terre.

Le plan de la CGS pour les prochaines années tient à encourager la participation active de la CGS au développement international qui fait époque. Les membres de la CGS assurent de précieux contacts internationaux par leur participation active dans une ou plusieurs sections, commissions ou groupes de travail de l'Association Internationale de Géodésie (AIG). Cette tradition nous vient du temps de la fondation de la CGS, il y a 125 ans, lorsque celle-ci, sous l'égide du président d'honneur, le Général Dufour, adhéra sur l'ordre du Conseil fédéral à la «Mitteleuropäische Gradmessung».

L'exposé suivant donne une vue d'ensemble des activités actuelles de la CGS, qui s'occupent de plus en plus de la mensuration de mouvements récents de la croûte terrestre dans la région alpine et qui peut par cela contribuer à la recherche de la géodynamique actuelle.

der Erdbebenforschung beschäftigt. Eingeleitet wurden die Entwicklungen durch neue Modellvorstellungen über die Erdoberfläche, die man mit dem Begriff «Globale Plattentektonik» überschreibt. Nach diesen Vorstellungen besteht die Erdoberfläche aus sechs grösseren sowie sieben kleineren, sich relativ zueinander bewegenden Lithosphärenplatten (Abb. 1). Es sind dies Amerika, Eurasia, Indien/Australien, Afrika, die Antarktis und der Pazifik, sowie Juan de Fuca, Scotia, Nazca, Cocos, die Karibik, Arabien und die Philippinische See. Diese Einheiten erstrecken sich von den mittelozeanischen Rücken bis zu den Subduktionszonen (Tiefseegräben bzw. alpidische Gebirgsgürtel) und können im Gegensatz zur Wegener'schen Theorie der Kontinentaldrift sowohl kontinentale als auch ozeanische Erdkruste enthalten. Ihre Ränder fallen also nicht mit den Kontinentalrändern, sondern mit den grossen Erdbebenbengürteln der Erde zusammen.

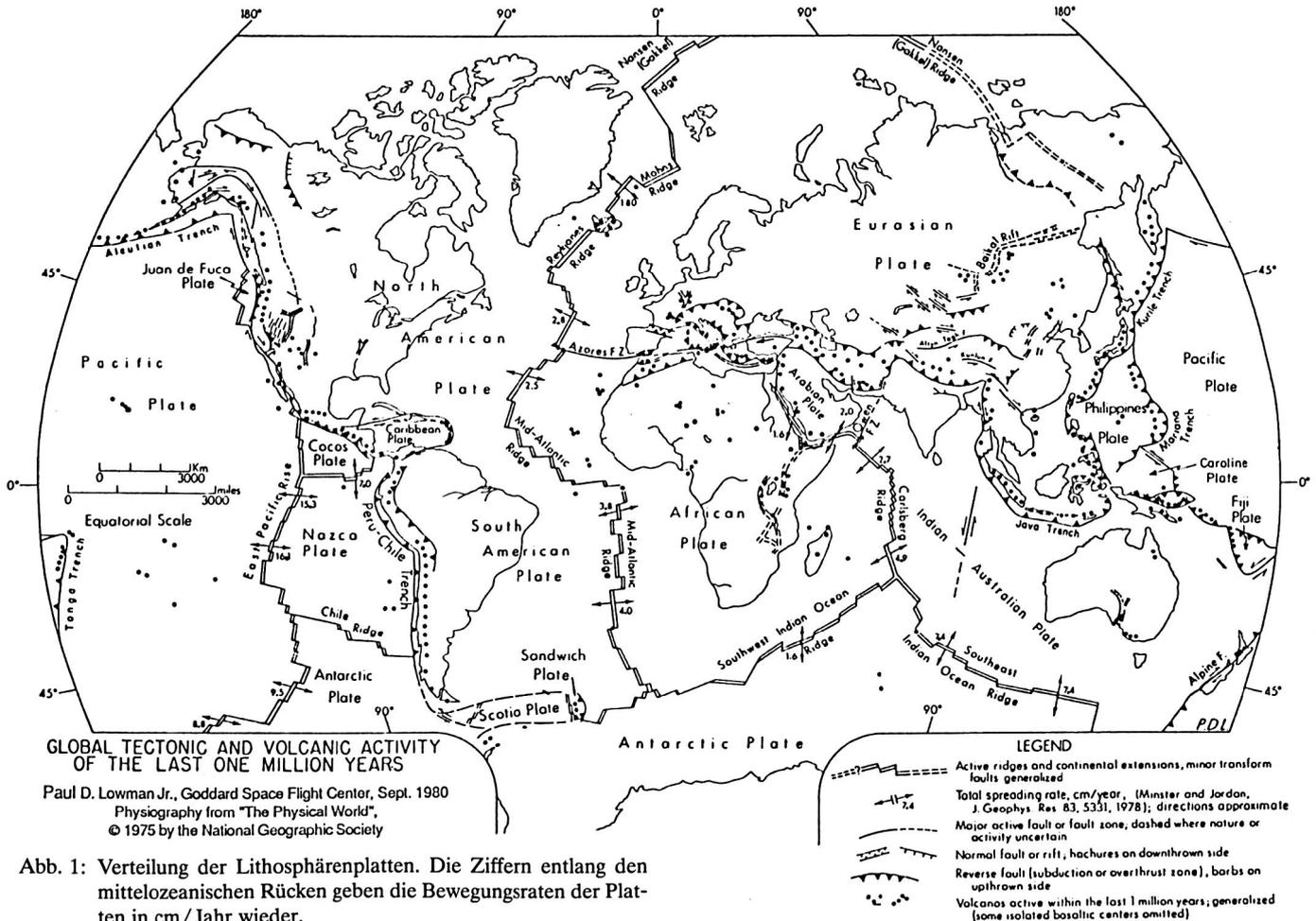


Abb. 1: Verteilung der Lithosphärenplatten. Die Ziffern entlang den mittelozeanischen Rücken geben die Bewegungsraten der Platten in cm/Jahr wieder.

In unserer nächsten Nachbarschaft liegt zum Beispiel die adriatisch/apulische Region, die als mögliche kleinere Lithosphärenplatte angesehen werden kann. Sie wird im Norden von den Alpen begrenzt. Die Entstehung der Alpen und die gegenwärtig ablaufenden geodynamischen Prozesse im Spannungsfeld zwischen der Eurasischen und der Afrikanischen Platte wurden kürzlich von Trümpy [1985] und St. Müller [1984, 1986] ausführlich beschrieben.

Konvektionsströme, die mit der Bewegung der Lithosphärenplatten von den mittelozeanischen Rücken zu den Subduktionszonen einhergehen, setzen einen grossräumigen Antriebsmechanismus voraus, dessen Studium eines der Hauptthemen von internationalen geodynamischen Projekten ist, an denen sich auch die SGK aktiv beteiligt.

Nach den Erkenntnissen der globalen Plattentektonik gibt es im wesentlichen drei Bewegungsvorgänge:

(1) In einigen Zonen gleiten die Platten horizontal aneinander vorbei. In anderen Gebieten kommt es (2) zu Kollisionen oder (3) zum Auseinanderdriften. Das bekannteste Beispiel für horizontales Vorbeigleiten ist die San Andreas-Verwerfung in Kalifornien. In Europa/Vorderasien ist es die Nordanatolische Verwerfung und in Lateinamerika die Boconó-Verwerfung. Kollisionszonen zeigen sich morphologisch als Tiefseegräben (z.B. Peru/Chile-Graben) oder alpidische Gebirgsgürtel (Himalaya, Alpen). Gebiete mit divergentem Bewegungssinn sind die kontinentalen Riftsysteme (z.B. Rheingraben, Oslograben, Ostafrikanischer Graben), junge Ozeanbecken (Rotes Meer, Golf von Aden) und die mittelozeanischen Rücken.

Im Verlauf der o.g. drei Bewegungsvorgänge kommt es zu lateralen Verschiebungen sowie zu Über- und Unterschiebungen. Dabei entstehen grosse Zug- und Druckspannungen, die sich in energiereichen Erdbeben und Vulkan-Eruptionen entladen können. Aktuelle Beispiele für solche Erdbeben sind das verheerende Ereignis von Mexiko am 19. September 1985, als sich die Cocos-Platte ruckhaft unter die Amerikanische Platte schob, oder die Erdbebenfolgen von Friuli im Jahre 1976, als die Apulische Platte unter der Eurasischen Platte abtauchte. Folgeschwere Eruptionen von Vulkanen sind z.B. die Explosion des Kaskadenvulkans Mount St. Helens (Mai 1980, U.S.A., Subduktion der Juan de Fuca-Platte) oder des Nevado del Ruiz (November 1985, Kolumbien, Subduktion der Nazca-Platte).

Nach wie vor sind die Bewegungsparameter der gegenwärtigen Ausbreitungsgeschwindigkeiten, des Aufstiegs neuen Krustenmaterials unter den mittelozeanischen Rücken, des Abtauchens in den Subduktionszonen und der Heraushebung in den alpidischen Gebirgsgürteln quantitativ nicht bekannt. Grössenordnungsmässig kann man jedoch mit Bewegungsraten von mehreren cm/Jahr rechnen (vgl. Abb. 1). Die Bedeutung moderner geodätischer Messtechniken besteht darin, die Parameter dieser globalen Lithosphärenverschiebungen zeitlich und geographisch zu erfassen.

Ziel des vorliegenden Aufsatzes ist es, die laufenden Aktivitäten und langfristigen Forschungspläne der SGK in diesem internationalen Rahmen aufzuzeigen und im Licht der modernen Technologien darzustellen.

2. «High-Technology»-Anwendungen der SGK

Ohne Zweifel hat die technologische Entwicklung der letzten drei Jahrzehnte viele Bereiche der geodätischen Tätigkeiten in entscheidender Weise verändert. In ganz besonderem Masse sind es die Möglichkeiten der Satellitengeodäsie, der elektronischen Messtechnik und der computergestützten Auswertung, die diese Entwicklung wesentlich vorangetrieben haben. Die Erweiterung des Potentials der verschiedenen Messverfahren hat die geodätischen Zielsetzungen ganz allgemein erweitert und im theoretischen Sinne bereichert. Sehr offensichtlich kommt dieser Einfluss in der Zusammenarbeit der SGK mit der Schweizerischen Geophysikalischen Kommission (SGPK, Präsident: St. Müller, ETH Zürich) im Bereich der Gravimetrie und Geodynamik zum Ausdruck. Ein typisches Element ist dabei, dass die geodätischen Messverfahren in immer konkretere Verbindung mit der Physik, der Informatik und den Geowissenschaften treten.

Einer besonders raschen Entwicklung unterliegt die *Satellitengeodäsie*. Neben der dopplergestützten Positionsbestimmung mit U.S. TRANSIT-Satelliten gibt es eine Reihe von neuen Satellitentechniken, die auf die Erdmessung und Geodynamik entscheidenden Einfluss ausüben werden. Speziell erwähnenswert sind folgende Gebiete:

- GPS (Global Positioning System): Satellitenempfangssysteme für Radiowellen von NAVSTAR-Satelliten [Gurtner und Beutler, 1986].
- SLR (Satellite Laser Ranging): Laserdistanzmessungen zu geodätischen Satelliten wie STARLETTE, LAGEOS etc., die mit Retroreflektoren ausgerüstet sind.
- VLBI (Very Long Baseline Interferometry): Bestimmung von hochgenauen interkontinentalen Basislinien mit Hilfe der Auswertung der Radiostrahlung von Quasaren.
- SST (Satellite-to-Satellite Tracking): Präzise Gravitationsfeld-Bestimmung im intermediären Wellenlängenbereich (100–300 km).

Zukünftige geodätische Messverfahren, die sich in besonderem Mass auf physikalische und astronomische Grundlagen abstützen, sind:

- Inertiale Messsysteme zur Bestimmung der Schwerefeldparameter und der Stationskoordinaten [Schwarz, 1985; Wiget, 1985, 1986].
- Präzisionsgravimetrie mit Hilfe von Supraleitfähigkeits-Gravimetern (relative Genauigkeit: $\pm 10^{-9} \text{ ms}^{-2}$) und laser-gestützten Absolut-Gravimetern ($\pm 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$) [Kahle et al., 1981].
- Digitale Bildverarbeitung: Ausmessung astro-geodätischer Aufnahmen mit CCD-Kameras
 - zur On-Line-Bestimmung der Richtung der Schwerkraftvektoren (\rightarrow Astronomische Geodäsie) [Bürki, 1985] sowie
 - zur Verknüpfung der astronomischen Fundamentalsysteme (\rightarrow Fundamentalastronomie) unter Einbezug der Abbildungen speziell geeigneter Satelliten [Bauersima, 1984].

Die folgenden Ausführungen beschreiben die Auswirkungen dieser Entwicklungstendenzen im Bereich der Erdmessung und Geodynamik, da sie zu einem besonderen Koordinationsschwerpunkt der SGK geworden sind.

3. Die SGK im Rahmen der globalen Geodynamik

Eine grosse Herausforderung für die SGK besteht darin, einen Beitrag zur Lösung der o.g. Probleme im Bereich der Erdmessung und Geodynamik zu leisten. Der Begriff *Geodynamik* ist in den letzten Jahren zu einem Reizwort geworden, in welchem ein sehr weites Spektrum geowissenschaftlicher Forschungsrichtungen verankert ist. Dieses Spektrum umfasst Untersuchungen der Positionsastronomie, genauso wie geophysikalische Untersuchungen zum Aufbau der Erdkruste und des Erdmantels; es beinhaltet Messungen von rezenten Erdkrustenbewegungen, genauso wie geologische Arbeiten zur Tektonik oder zur Altersbestimmung der Erdkruste.

Um Missverständnissen vorzubeugen, ist es daher notwendig, die geodynamischen Probleme hinsichtlich der räumlichen Ausdehnung und der zeitlichen Beanspruchung zu untergliedern. Ein Beispiel zur *räumlichen* Gliederung ist die Gegenüberstellung zwischen der globalen Polbewegung und den lokalen Erdbeben; ein Beispiel zur *zeitlichen* Einteilung ist die Gegenüberstellung zwischen einer mehrere 100 Millionen Jahre andauernden konvektiven Bewegung des Lithosphären/Asthenosphärensystems und der Gezeitenwirkung mit Perioden von nur wenigen Stunden. Die Klassifizierung der geodynamischen Probleme nach Wellenlänge und Zeit ist nicht nur für die begriffliche Klarstellung wichtig, sondern erleichtert auch eine Diskussion über die Planung des Einsatzes und der Neubeschaffung von Apparaturen. Beispielsweise würde man einerseits nicht auf die Idee kommen, den globalen Chandler-Wobble mit Hilfe von elektronischen Distanzmessgeräten zu erfassen, oder andererseits eine lokale Verwerfungszone mit Hilfe des LAGEOS-Satelliten zu verfolgen.

Es ist daher naheliegend, eine Unterteilung der Geodynamik in (a) *globale*, (b) *regionale* und (c) *lokale* Probleme vorzunehmen.

(a) *Globale Phänomene* der Geodynamik entsprechen Wellenlängen von mehr als 500 km. Die NASA hat hierzu seit 1972 systematische Methoden im Rahmen des Satellite-Laser-Ranging-Programmes entwickelt. Beispiele sind die Bestimmungen der Polbewegung und der Erdrotation mit Hilfe von Laserdistanzmessungen zum Mond und zu künstlichen Satelliten sowie mit Hilfe von quasistellaren Radioquellen (VLBI). Für die globalen Fragestellungen und die Anchlüsse regionaler Messungen an das weltweite Bezugssystem sind Referenzstationen wichtig, die durch permanente Observatorien realisiert werden. Die NASA geht davon aus, in Zukunft von 40 weltweit verteilten Stationen Daten über die Vermessung geodätischer Satelliten erhalten zu können. Die Aufgabe dieses *permanenten* Stationsnetzes besteht darin, absolute Referenzpunkte für *mobile* Stationen zu bilden, um die weltweiten Lithosphärenbewegungen bestimmen zu können. In der Schweiz wird diese Aufgabe von der Satelliten-Beobachtungsstation Zimmerwald wahrgenommen.

Mitte der siebziger Jahre hatte das Astronomische Institut der Universität Bern (AIUB) begonnen, in Zimmerwald eine Satellitenstation aufzubauen, die es ermöglichen sollte, mit Hilfe hochpräziser Laserdistanzmessungen einen Beitrag zur Lösung globaler und regionaler geodynamischer

scher Fragen zu leisten. Seit einigen Jahren nimmt die Station Zimmerwald regelmässig an internationalen Messkampagnen teil. Die Laserdistanzmessung von weltweit verteilten permanenten Laserstationen zu den Geodynamik-Satelliten ist die z.Zt. genaueste Methode, ein globales, im Schwerpunkt der Erde gelagertes, erdfestes Bezugssystem zu realisieren. Die Referenzpunkte dienen dazu, globale und regionale plattentektonische Prozesse quantitativ zu erfassen. In Zukunft wird ihre Bedeutung noch beträchtlich zunehmen, da sie die Grundlage bilden, um die erwähnten neuen satellitengestützten Vermessungsverfahren (GPS) national und international für die Landesvermessung und Geophysik einsetzen zu können. Die Station Zimmerwald stellt die Verbindung zwischen den geodätisch/geodynamischen Netzen in der Schweiz und denjenigen im europäischen und interkontinentalen Ausland her.

(b) Mobile Laserteleskope kommen für *regionale Probleme* in Betracht. Sie können in regionalseismischen Zonen zu einem Kontrollnetz zusammengeschlossen werden, wo etwa 100 Stationen pro Jahr weltweit vermessen werden sollen. In einem schweizerischen Pilotprojekt wurden dazu im Herbst 1985 Laser-Messungen mit einem mobilen Laserteleskop der TU Delft (Abb. 2) auf dem Monte Generoso durchgeführt [Bürki et al., 1986]. Als Referenzstation diente die Station Zimmerwald. Nicht zuletzt aufgrund der Koordination der SGK zwischen dem AIUB, dem Institut für Geodäsie und Photogrammetrie (IGP) der ETH Zürich, dem Satellitenobservatorium Delft und der NASA konnte diese Kampagne finanziert und erfolgreich abgeschlossen werden.

(c) *Lokale Probleme* beschränken sich auf kleinräumige seismische Zonen. Die Bedeutung dieser Netze ist im Zusammenhang mit dem Studium der Krustenbewegungen vor, während und nach dem Auftreten von Erdbeben unbestritten.

Im Bereich des lokalen Einsatzes von mobilen Stationen spricht man z.B. vom ARIES-Projekt (= Astronomical Radio Interferometric Earth Surveying), in dem man mit 4-m-Antennen Radiointerferometrie betreibt. Weitere Pläne sind «Space-Borne Laser Ranging» von Satelliten zu Retroreflektoren am Boden sowie die sehr zukunftssträchtige Methode des NAVSTAR-Systems mit GPS-Satelliten, die auch für die Schweiz besonders wichtig werden dürfte.

Die radiowellengestützte Positionierung mit GPS-Satelliten wird mit der fortschreitenden Miniaturisierung elektronischer Messeinheiten einen revolutionierenden Einfluss auf die ganze Geodäsie ausüben. Gerade in den Bergregionen der Schweiz dürften die zu Beginn dieses Jahrhunderts vermessenen traditionellen Triangulationsnetze durch GPS-Referenzpunkte ergänzt werden. Anstatt die Netzpunkte auf die höchsten Bergspitzen zu legen, können sie in solidem Fels an zugänglichen Stellen vermarktet werden. Die hohen Genauigkeiten des GPS rücken kinematische Aspekte ins Blickfeld der Geodäten und Geophysiker. Zum einen sind die zeitlichen Änderungen der Referenzkoordinaten in Betracht zu ziehen, zum andern liefern gerade diese Punktbewegungen interessante und wertvolle Hinweise auf rezente Krustenbewegungen. Die modernen Satelliten-Methoden werden auch neue Möglichkeiten auf dem Gebiet der Ingenieurvermessung und Navigation eröffnen [Matthias, 1985]. Man denkt hier an automatische Kontrollen von Absenkungen und Rutschungen oder an die Überwachung von Bauwerken, wie z.B. Staudämme.

Um die zukünftigen GPS-Aktivitäten auf europäischer Ebene zu koordinieren, wurde vom Europarat im Rahmen der Working Party on Geody-

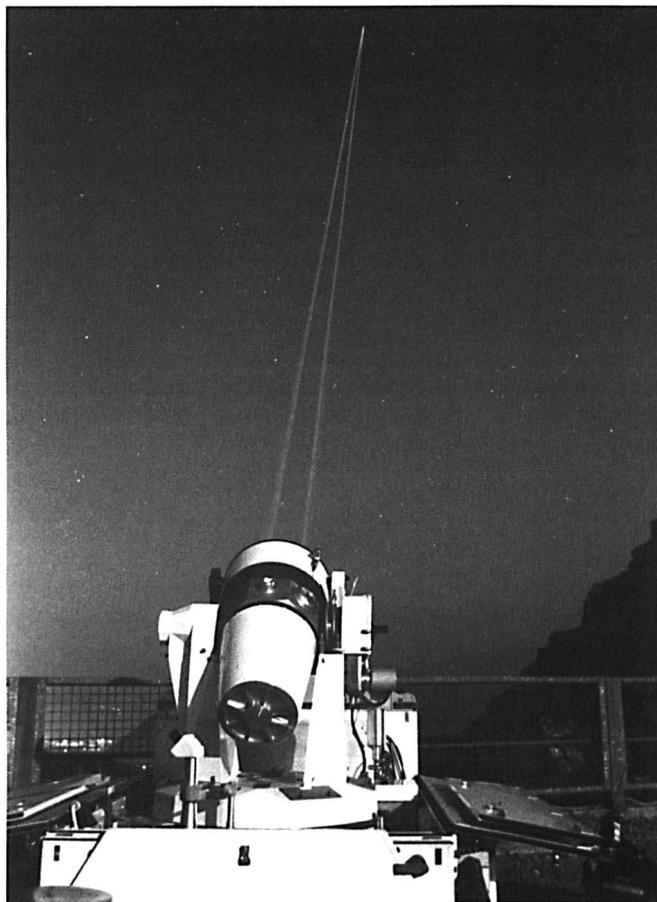


Abb. 2: Modular Transportable Laser Ranging System MTLRS-2 (TU Delft) beim Messen der Distanz vom Monte Generoso zum LAGEOS-Satelliten. Die zwei Teilstrahlen entstehen durch Aufspaltung des Hauptstrahls, um damit das «blinde» Zentrum der Optik, wo ein Hilfsfernrohr zur Detektion von Flugzeugen oder der Sonne montiert ist, ohne Energieverlust auszublenden.

namics die Koordinationsgruppe SATRAPE (Satellite Radio Positioning in Europe, Präsident: C. Boucher, IGN, Paris) gegründet. Die Schweiz ist darin über die SGK durch verschiedene ihrer Mitglieder vertreten. In einem ersten konkreten Schritt wurde eine GPS-Arbeitsgruppe der SGK eingesetzt, mit dem Ziel, die neuen geodätischen Satellitenverfahren in die aktuellen Forschungsvorhaben zu integrieren und einen Beitrag zu den SATRAPE-Projekten zu leisten. Die GPS-Gruppe besteht aus Vertretern des AIUB, des Bundesamtes für Landestopographie (L+T), des IGP der ETH Zürich und der EPF Lausanne sowie der Firmen Wild (Heerbrugg) und Kern (Aarau), des CERN (Genf) und der Eidgenössischen Vermessungsdirektion (V+D).

In einem ersten Projekt haben die L+T, das AIUB und das IGP in enger Zusammenarbeit ein GPS-Testnetz bei Turtmann im Rhonetal etabliert (Abb. 3) und Pilot-Kampagnen in den Jahren 1985 und 1986 durchgeführt [Geiger et al., 1986]. Das Netz ist für den Vergleich der klassisch/terrestrischen Verfahren mit den neuen satellitengestützten Methoden von grosser Bedeutung. Bereits im Juni 1986 wurden terrestrische Präzisions-Distanzmessungen mit dem neu entwickelten Mekometer ME 5000 [Meier und Aeschlimann, 1986] der Firma Kern (Aarau) durchgeführt. Ausserdem sind weitere Satellitenmessungen mit Satellitenempfängern WM101 der Firma Wild (Heerbrugg)/Magnavox sowie 4000S der Firma Trimble im Turtmann-Netz erfolgreich abgeschlossen worden. Die bisherigen Auswertungen zeigen für die bis zu 5 km langen Basislinien Übereinstimmungen mit der vorläufig-

gen terrestrischen Lösung in der Grössenordnung von ± 7 mm [Rotacher et al., 1986]. Die ersten Ergebnisse wurden kürzlich von W. Gurtner (AIUB) in einem internationalen Satelliten-Symposium in Austin, Texas, vorgestellt. Ein gravierendes Problem stellt die Refraktion bei den Höhenbestimmungen mit GPS im Hochgebirge dar, wenn man relative Höhen-Genauigkeiten im 1-ppm-Bereich oder sogar darunter fordert.

4. Zielgrössen der Geodäsie

Fundamentale «klassische» Zielgrössen der Geodäsie sind: Höhenwinkel, Richtungen, Entfernungen, Höhen, Schwerebeschleunigungen und Lotrichtungen (Abb. 4 und 5).

Diese Parameter werden u.a. im Rahmen der geodätischen Landesvermessung (L+T und z.T. IGP) bestimmt. Aufgabe der Landesvermessung ist es, für alle praktischen, aber auch für viele wissenschaftliche Aufgaben ein einheitliches, landesweites Referenzsystem zur Verfügung zu stellen. Die Ansprüche an dieses Referenzsystem steigen ständig. Immer wichtiger wird auch die Beziehung des schweizerischen zum europä-

ischen und zum weltweiten Referenzsystem. Diese Genauigkeitsansprüche werden zur Zeit noch vom Europäischen Höhennetz REUN und vom Europäischen Triangulationsnetz RETrig einigermaßen erfüllt. Bereits in den nächsten fünf Jahren wird aber ein neues, mit satellitengestützten Methoden bestimmtes 3D-Referenzsystem dringend notwendig. Ein solches System kann nur realisiert werden, wenn auf nationaler Ebene alle interessierten Institutionen zusammenarbeiten und zugleich auf internationaler Ebene koordiniert wird. In der Schweiz ist es die SGK, die diese koordinierende Funktion wahrnimmt.

Als Beispiel für die bisherigen Messmethoden der klassischen Zielgrössen seien genannt:

Triangulation, Trilateration, Nivellement, Astronomische Orts- und Zeitbestimmung und die Gravimetrie.

Zu diesen herkömmlichen Verfahren sind, wie eingangs erwähnt, erfolgreiche Neuentwicklungen aus dem «High-Technology»-Bereich hinzugekommen, wie z.B. die elektrooptischen Distanzmessungen, inertielle Messsysteme sowie die modernen Satellitentechniken (SLR, GPS) und Methoden aus der kosmischen Geodäsie (VLBI).

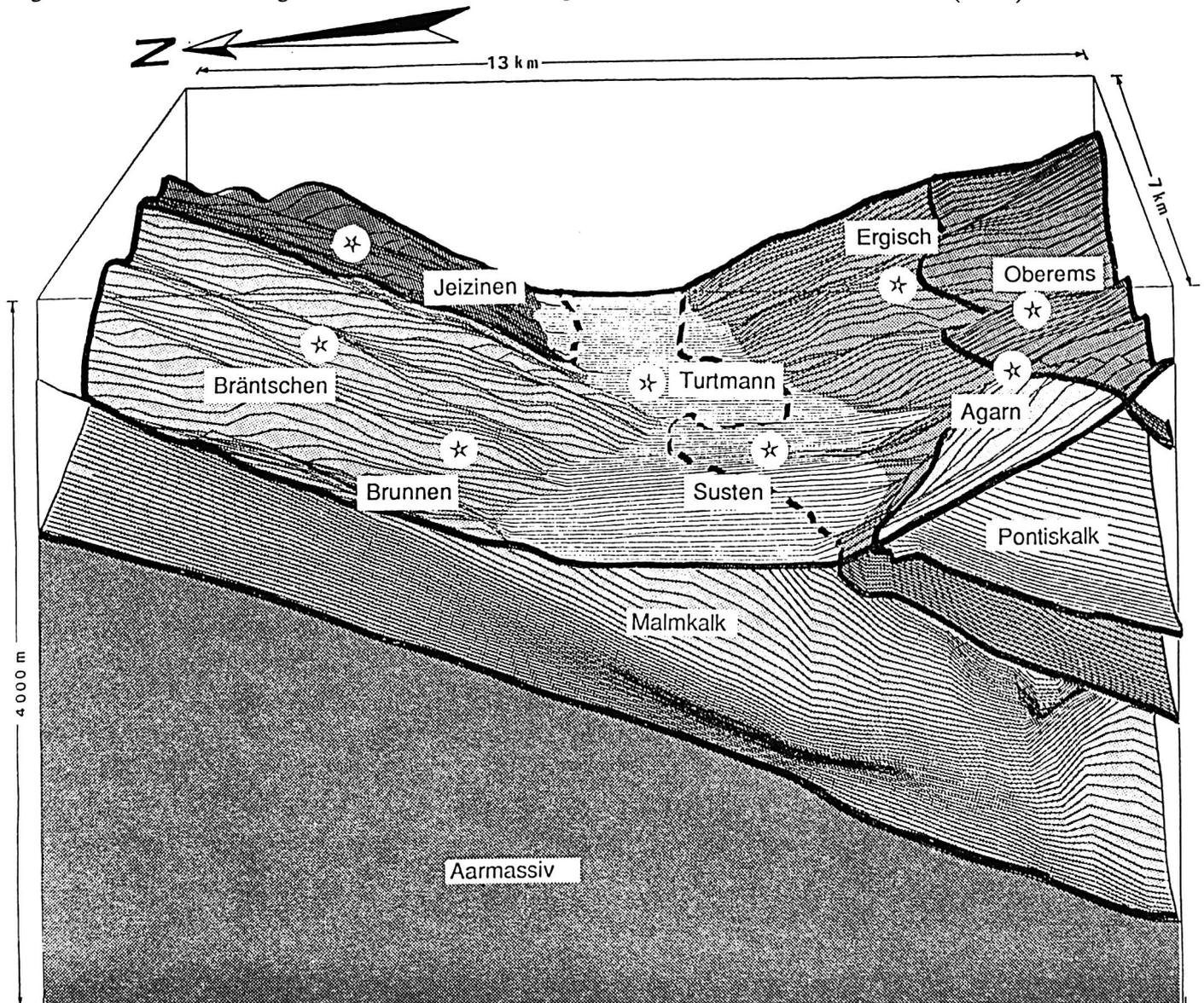


Abb. 3: GPS-Testnetz Turtmann. Geologische Struktur aufgrund von gravimetrischen Daten (Nach Bernauer und Geiger, 1986).

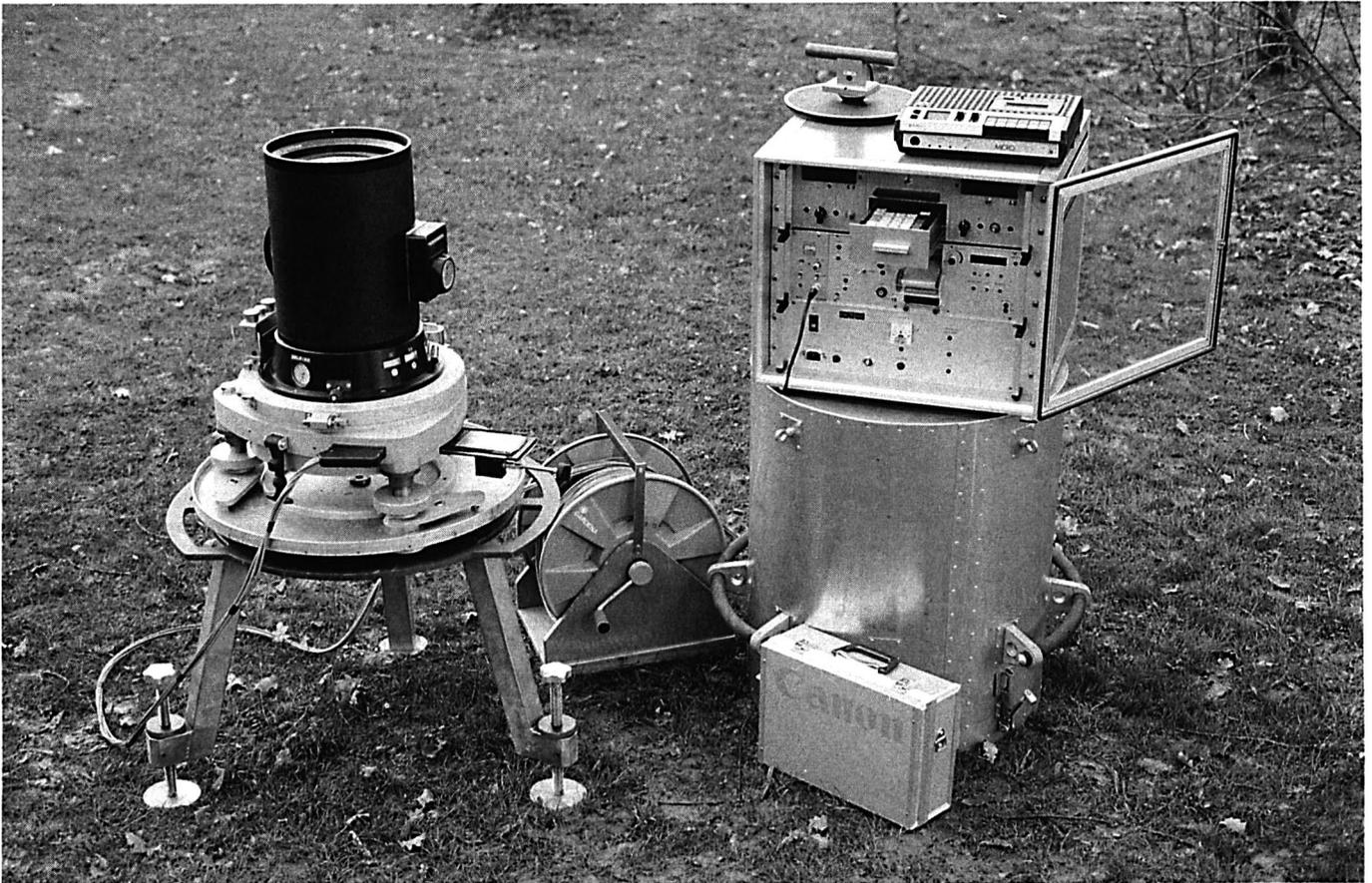


Abb. 4: Transportable Zenitkamera TZK 3 des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie der ETHZ zur Bestimmung der Lotrichtung.



Abb. 5: Einsatz der TZK 3 im GPS-Testnetz Turtmann.

Diese klassischen Zielgrößen dienen primär den Zielsetzungen der Landesvermessung, stellen aber zugleich auch Grunddatensätze für geophysikalische Anwendungen dar, wie sie zum Teil von der SGPK verfolgt werden.

Als Beispiele seien drei Gebiete herausgegriffen:

- (1) *Erdbebenvorhersage*
Für die Erfassung der Vorläufer von Erdbeben sowie der co-seismischen und post-seismischen Bewegungen können horizontale und vertikale Kontrollnetze, Wiederholungs-Schweremessungen, Satellitendistanzmessungen und radiointerferometrische Messmethoden benutzt werden.
- (2) *Konvektive Bewegungsvorgänge im Lithosphären/Asthenosphärensystem*
Für die mit Mantelkonvektionen verbundenen aseismischen Deformationen der Erdkruste können gravimetrische Daten zur Schwereverteilung und zu den Geoidundulationen herangezogen werden. Die intermediären Wellenlängen des Schwerefeldes sind vorzugsweise mit Satellitenmethoden zu bestimmen. Beispiele hierfür sind Methoden der Satelliten-Altmetrie oder des «Satellite-to-Satellite Tracking»-Verfahrens.
- (3) *Viskosität im Erdinnern*
Für die Viskositätsverteilung im Erdinnern, die eine wichtige physikalische Information für ein weites Spektrum von geophysikalischen Fragestellungen darstellt, sind z.B. Gezeitenmessungen, die Bestimmung der Polbewegung und Erdrotation sowie die Erfassung postglazialer Hebungen von entscheidender Bedeutung.

Die Nahtstelle zwischen den geodätischen Techniken und den geophysikalischen Problemen liegt im Bereich der Geodynamik, die damit zum gemeinsamen Forschungsprojekt für beide Fachgebiete wird. Dieser Trend lässt sich sehr gut auf die Untergliederung der Internationalen Assoziation für Geodäsie (IAG) projizieren (vgl. Organigramm in Abb. 6). Die fünf IAG-Sektionen

- (I) **Positioning,**
- (II) **Advanced Space Technology,**

- (III) **Determination of the gravity field,**
- (IV) **General theory and methodology** sowie
- (V) **Geodynamics**

führen in einer logischen Brückenbildung zur Internationalen Assoziation für Seismologie und Physik des Erdinnern (IASPEI, Präsident: St. Müller, Geophysik, ETH Zürich) sowie zur Inter-Union Commission on the Lithosphere (ICL).

5. Geförderte Arbeiten der SGK

Wenn man die bisher koordinierten und z.T. mitfinanzierten Arbeiten der SGK im Hinblick auf die oben skizzierten zukünftigen Ziele bewertet, kann man feststellen, dass bereits wichtige Vorbereitungs-Arbeiten in Form von gezielten Basismessungen ausgeführt worden sind. Sie lassen sich auf natürliche Weise in ein geodätisches Konzept einfügen, das den aktuellen internationalen Aktivitäten weitgehend entspricht. Es sei hierbei an Projekte wie die Präzisionsnivellements der L+T, die astronomischen Ortsbestimmungen, die astro-geodätischen Nivellements im Meridian des St. Gotthard und im Parallel von Zürich, an die Höhenwinkelmessungen im Berner Oberland, die Basismessung Heerbrugg, die elektromagnetischen Distanzmessungen über die Alpen und die Insubrische Linie hinweg, an die mit LAGEOS vermessene Trans-Alpine Basislinie Zimmerwald–Monte Genovese, an die astro-geodätische [Gurtner, 1978] und gravimetrische [Geiger und Kahle, 1986] Geoidbestimmung, an die Erstellung des schweizerischen Schwerenetzes und an das GPS-Testnetz Turtmann erinnert.

Das zur Zeit laufende Arbeitsprogramm der SGK ist im folgenden zusammengefasst. Die Projekte zeigen die Bemühungen der SGK, in Richtung der geschilderten aktuellen Aufgaben vorzustossen.

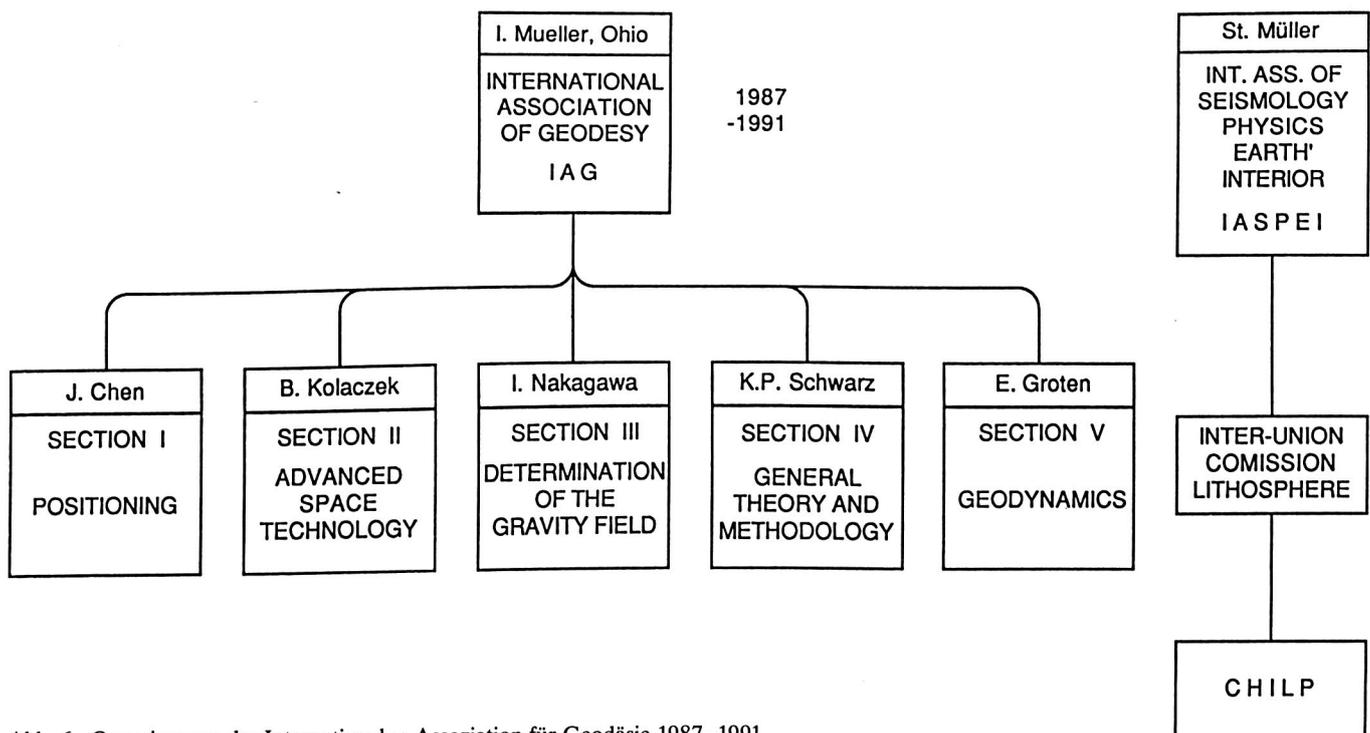


Abb. 6: Organigramm der Internationalen Assoziation für Geodäsie 1987–1991.

6. Laufende Forschungsprojekte der SGK

Satelliten-Doppler-Kampagnen:

Das IGP der ETH Zürich führte im Rahmen des Alpine Geoid Doppler Project (ALGEDOP) und von SWISSDOC mit ausländischen Instituten Messkampagnen (Abb. 7) durch [Wiget et al., 1986; Geiger und Müller, 1987].

GPS-Messkampagnen:

- Im Rhonetal (Turtmann) wurde ein Testnetz für Messungen mit dem Global Positioning System (GPS) errichtet (L+T) und 1985/1986 erste Testmessungen mit Geräten von Macrometer, Sercel, Texas Instruments (TI 4100), WM 101 und Trimble durchgeführt (IGP) und ausgewertet (AIUB) [Gurtner et al., 1987; Cocard, 1987].
- Auswertung der GPS (Macrometer)-Kampagne (Dezember 1984) im CERN-LEP-Netz [Gurtner, 1986].
- Gesamtauswertungen der Turtmann-Testkampagnen und Darstellung der auftretenden Probleme [Gurtner et al., 1987; Beutler et al., 1987; Geiger, 1987].
- In einer Kampagne (GRANIT) mit geodynamischen Zielsetzungen wurden 1987 in Zusammenarbeit mit deutschen und österreichischen Instituten 12 Punkte im Gebiet der Schweiz mit 2-Frequenz-Geräten (TI 4100) eingemessen.

Geodätische Astronomie:

Mit dem neuen computergestützten Auswertesystem des IGP wurden die astrogeodätischen Messungen der Jahre 1984 bis 1986 ausgewertet. Zudem wurden neue Messungen im Bereich der Ivrea-Zone ausgeführt und Rekognoszierungen für das Nationale Forschungsprogramm «Geologische Tiefenstruktur der Schweiz» vorgenommen [Bürki, 1985; Wirth, 1985; Wirth et al., 1987].

RETrig:

Die Aktivitäten von 1985 standen im Zeichen des von der IAG-Subkommission Réseau Européen de Triangulation (RETrig) im Dezember 1985 in Den Haag durchgeführten Symposiums. Ein Landesbericht wurde dazu abgeliefert. Für die RETrig-Phase III wurde die Nahtlinie mit Frankreich bereinigt. Zur Zeit befindet sich RETrig in der Schlussphase. Die definitive Lösung wurde 1987 anlässlich der IUGG-Generalversammlung in Vancouver präsentiert.

Gravimetrische Geoidbestimmung:

Neuerdings wurde die Fourier-Transformation implementiert und die Bestimmung von Auto- und Kreuzkorrelationen verschiedener Datensätze vorgenommen [Geiger und Kahle, 1986].

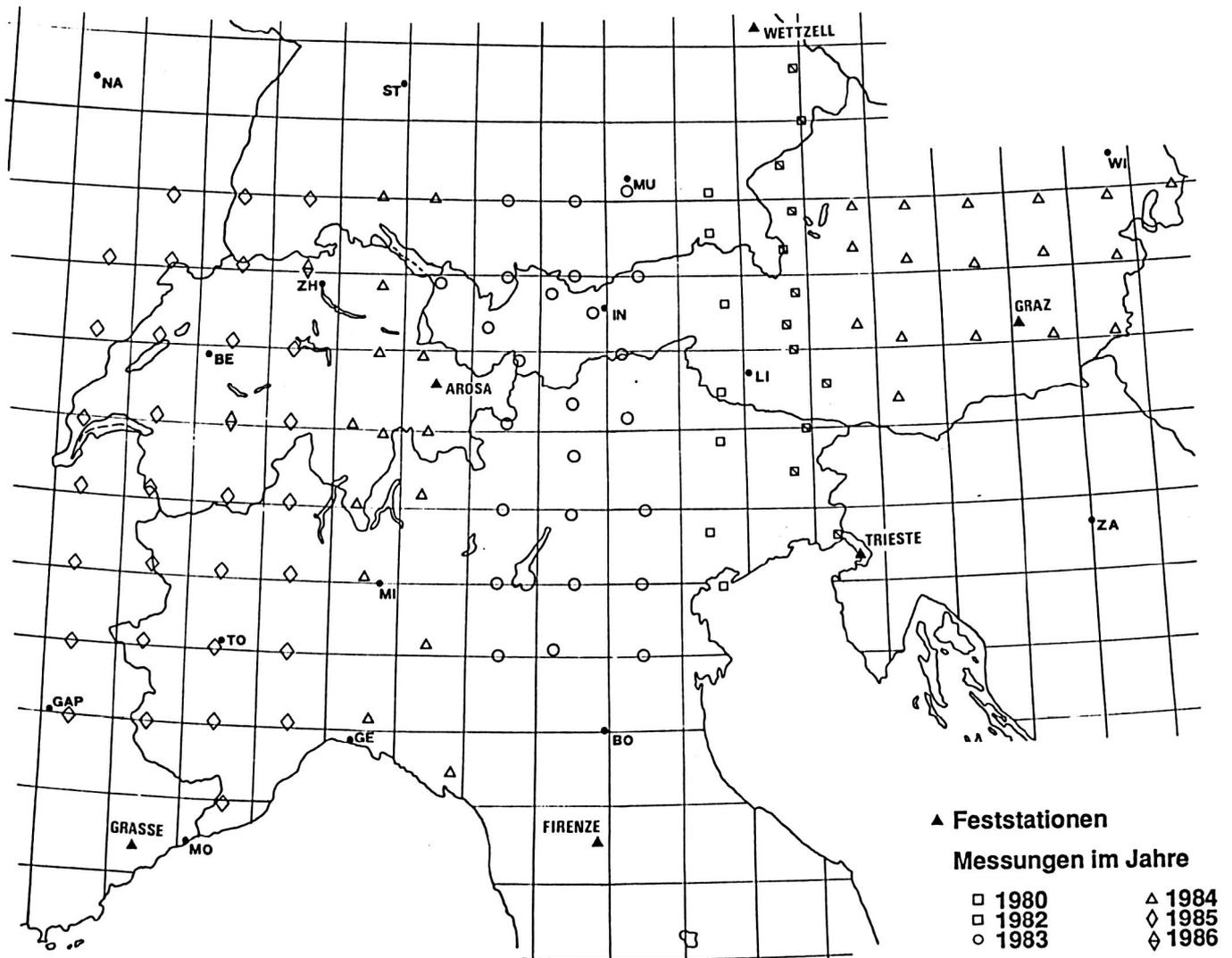


Abb. 7: ALGEDOP. Gesamtüberblick über die Messungen 1980–1985.

Absolute Schweremessungen:

1986 sind weitere Absolut-Schweremessungen (Abb. 8) im Gotthard-Strassentunnel durchgeführt worden (Klingelé und Marson), nachdem eine erste Serie derartiger Präzisionsmessungen bereits 1978–1980 realisiert werden konnte [Kahle et al., 1981].

Erdzeitenmessungen:

In Zusammenarbeit mit dem Institute of Oceanographic Sciences (Bidston Observatory, England) wurde auf zwei Fundamentalstationen des schweizerischen Schwerenetzes (ETH-Hönggerberg und Kantonsschule Chur) ein LaCoste & Romberg Gezeitengravimeter (Abb. 9) installiert. Vom November 1985 bis Juni 1986 und von Juni 1987 bis November 1987 konnte eine kontinuierliche, je sechsmonatige Messreihe erhoben werden.

Landesnivellement und Réseau européen unifié de nivellement (REUN):

Die Linien Lungern–Luzern und Brienzwiler–Grimsel-Gletsch sind neu gemessen worden. Für die Berechnung geopotentieller Koten wurden auf diesen Linien relative Schweremessungen durchgeführt. Überblick Landesnivellement und geophysikalische Implikationen siehe [Gubler et al., 1981].

Rezente Krustenbewegungen (RCM):

Die Auswertung der 1984 gemessenen Linie Fribourg–Vevey des Landesnivellements hat die früher gefundenen Ergebnisse im Rahmen der Messgenauigkeit bestätigt. Überblick RCM siehe [Jeanrichard, 1986] sowie Jeanrichard, in diesem Band.

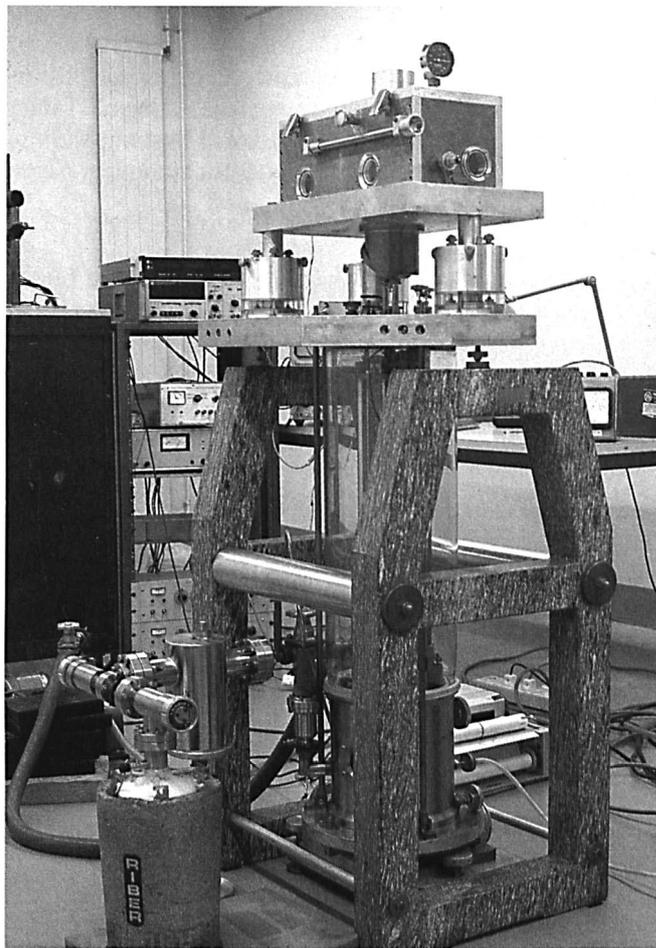


Abb. 8: Apparatur für die absolute Schwerebestimmung (Istituto di Metrologia «G. Colonnetti», Torino) im Messkeller der ETH-Hönggerberg.

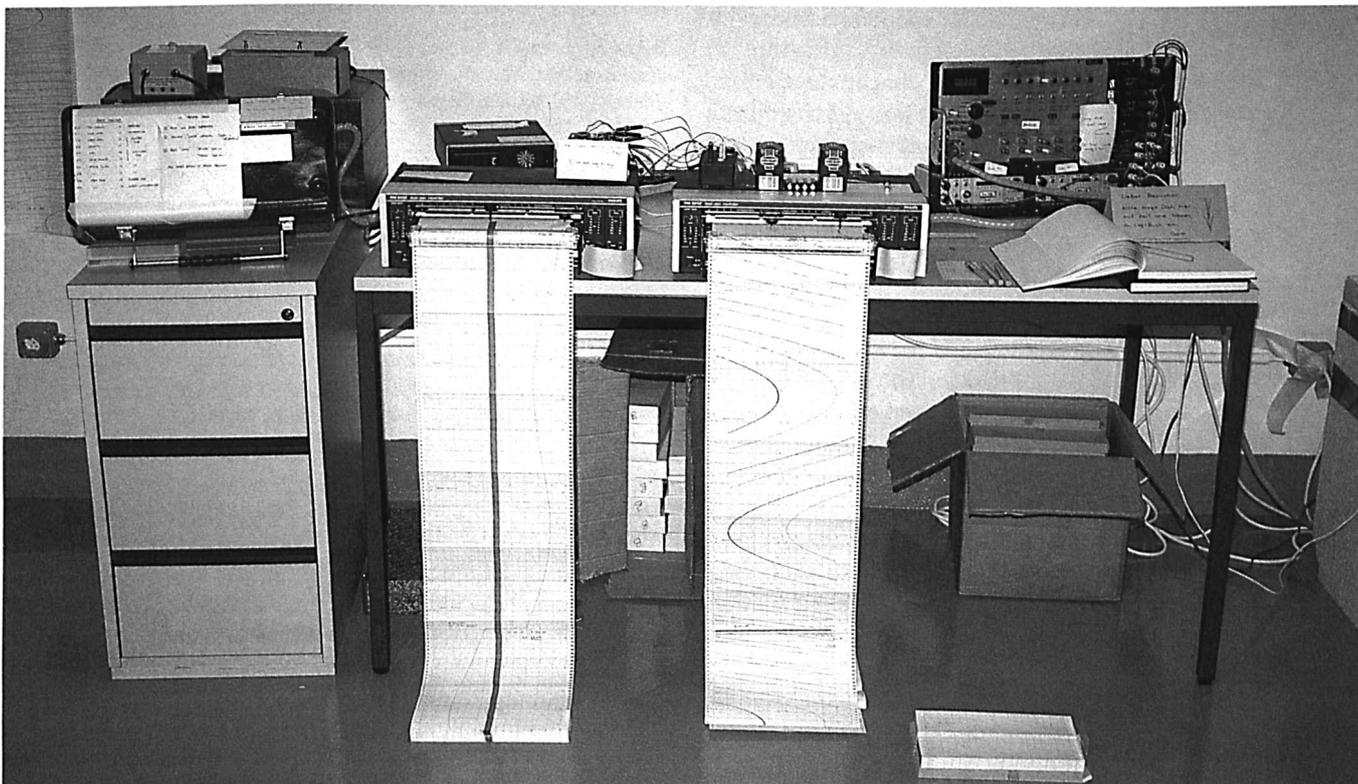


Abb. 9: LaCoste & Romberg Gezeiten-Gravimeter (Institute of Oceanographic Sciences, Bidston, England).

Alpentravese Gotthard:

Mit Hilfe von elektronischen Distanzmessungen (siehe Kartenbeilage) soll der Massstab der schweizerischen Landesvermessung über die Alpen bestimmt werden (Elmiger, ETHZ). Gleichzeitig ergibt sich die Möglichkeit zur Bestimmung von allfälligen Krustenbewegungen in N-S-Richtung der Alpen (Jura–Gotthard–Tessin).

Refraktion:

Für das Projekt Alpentravese wurden verschiedene Linien im schweizerischen Triangulationsnetz 1. und 2. Ordnung mit Motorseglern befliegen und zum Zwecke der genaueren Distanzreduktion der Luftdruck, die Temperatur und der Taupunkt entlang den Linien mit ATAR-Sonden gemessen (Chaperon und Köchle, ETHZ). Versuche zur statistischen Behandlung der Refraktion wurden von Wunderlin [1987] unternommen.

Geo-Informationssysteme:

Das NF-Projekt (IGP) über Integrierte Geo-Informationssysteme (Strukturierung grosser Mengen komplexer Messdaten in der Geodäsie) ist im Dezember 1985 in Angriff genommen worden (Conzett, ETHZ). Vorerst wurden die Entitäten der klassischen Triangulation strukturiert und die Struktur auf dem Standard-Datenbanksystem UNIFY erprobt. Die Arbeit vollzieht sich im Kontakt mit einer Gruppe aus dem Institut für Informatik der ETHZ.

Inertiale Messsysteme (IMS):

Evaluierung der Integration IMS/GPS [Wiget, 1985, 1986].

Satelliten-Beobachtungsstation Zimmerwald:

Teilnahme am WEGENER-MEDLAS-Projekt im Polygonzug Zimmerwald–Jungfraujoch–Monte Generoso durch lasertelemetrische Beobachtungen zu Satelliten und zum Fixpunkt am Jungfraujoch (Gurtner und Schildknecht, AIUB [Bürki et al., 1987]). Die Station Monte Generoso wurde mit dem holländischen mobilen Laserteleskop (vgl. Abb. 2) besetzt und führte gleichzeitig analoge Beobachtungen durch. Das gemeinsam mit dem IGP der ETHZ durchgeführte Experiment soll nach einigen Jahren wiederholt werden und einen Beitrag zur Untersuchung der rezenten Krustenbewegungen im Alpenraum leisten (siehe Kartenbeilage).

7. Ausblick

Bei allem gerechtfertigten Optimismus für die neuen GPS-Radiowellenverfahren der Satellitengeodäsie ist sich die SGK bewusst, dass auch noch eine Fülle von «terrestrischen» Problemen (Troposphären-, Ionosphäreneinfluss, Mehrfachreflexionen usw.) zu lösen sind. Deren Bearbeitung setzt die Kenntnis der Koordinaten von Basislinien voraus, die auf möglichst genauen Testnetzen (z.B. Turtmann) mit terrestrischen Messverfahren gewonnen werden können («Ground Truth»). Hier ist eine intensive Zusammenarbeit mit schweizerischen Herstellern von Vermessungsinstrumenten angezeigt (Fa. Kern, Fa. Wild/Magnavox), um die sich die SGK mit Nachdruck bemüht.

Die neuen Technologien verlangen eine starke Erweiterung des Wissensspektrums, die den Rahmen der traditionellen geometrisch-geodätischen Kenntnisse sprengen werden.

Damit wird langfristig auch eine einschneidende Umorientierung in Forschung, Lehre und Beruf erfolgen.

Die Forschungsplanung der SGK für die kommenden Jahre zielt darauf ab, an der beschriebenen Entwicklung der Geodäsie in internationaler Zusammenarbeit aktiv mitzuwirken, um die Implementierung zukunftsorientierter satellitengestützter Navigationssysteme in die geodätische Forschung zu fördern und für die Geo-Wissenschaften nutzbar zu machen. Enge Kontakte werden in diesem Zusammenhang bereits seit längerer Zeit mit der Schweizerischen Geophysikalischen Kommission (SGPK) der SNG gepflegt. Zudem sieht die SGK ihre Aufgabe darin, den Transfer zwischen der wissenschaftlichen Grundlagenforschung und der Vermessungspraxis zu fördern. Nicht zuletzt bemüht sich die SGK auch darum, einen Beitrag zur Koordination der geodätischen Tätigkeiten der Hochschulen mit denjenigen des Bundes und der schweizerischen Vermessungsfirmen zu leisten.

Ohne die finanziellen Beiträge des Schweizerischen Nationalfonds, der SNG, der Universität Bern, des Bundesamtes für Landestopographie und der ETH Zürich wären diese Projekte nicht realisierbar. Diesen Institutionen gebührt daher unser besonderer Dank. Nach 125jähriger Mitgliedschaft in der SNG hofft die SGK auch weiterhin auf die wohlwollende Unterstützung und zukünftige Förderung der SNG, damit die gesteckten Ziele im Sinne der obigen Ausführungen leichter verwirklicht werden können.

8. Ausgewählte Referenzen von Arbeiten, die im Rahmen der SGK ausgeführt worden sind

Bauersima, I. (1984): Coupled Quasar, Satellite and Star Positioning. Mitteilungen der Satelliten-Beobachtungsstation Zimmerwald Nr. 13.

Bernauer, I. und A. Geiger (1986): Lokale Schwerefeldbestimmung und gravimetrische Modellrechnungen im Satelliten (GPS)-Testnetz «Turtmann» (Wallis). Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz, Band 38, 106 S.

Beutler, G. und M. Rothacher (1986): Auswertung der 1984-Alaska-GPS-Kampagne. VPK 6/86, S. 213–218.

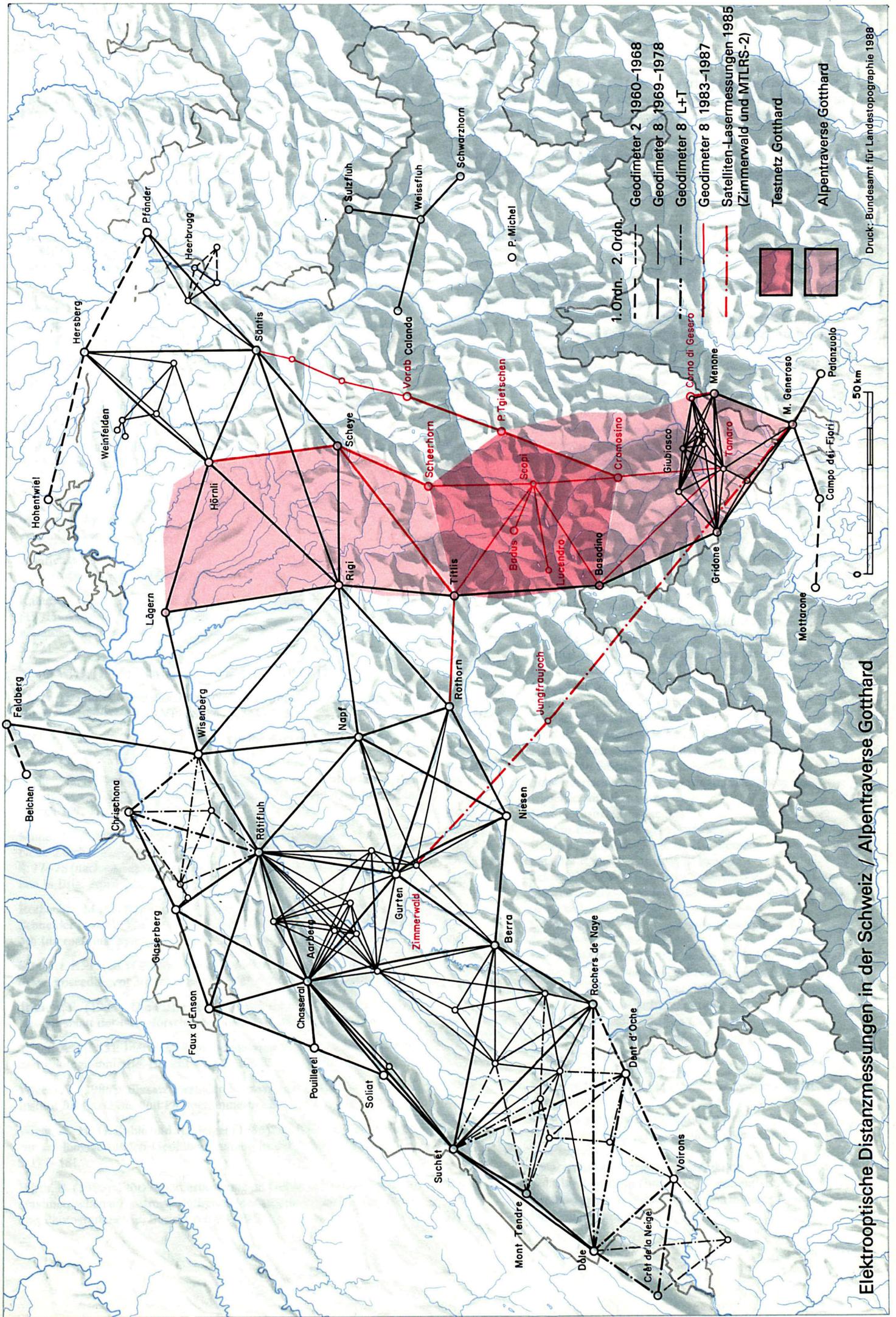
Beutler G., I. Bauersima, W. Gurtner, M. Rothacher, T. Schildknecht and A. Geiger (1987): Atmospheric Refraction and Important Biases in GPS Carrier Phase Observations. Paper presented at IUGG General Assembly, Vancouver, August 1987.

Bürki, B. (1985): Die operationelle Bestimmung von Lotabweichungen, mit Erläuterungen zur transportablen Zenitkamera TZK 3 des IGP und zum computergestützten Auswertesystem. Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Bericht Nr. 91, 33 S.

Bürki, B., H.-G. Kahle, E. Vermaat und D. van Loon (1986): Laserstrahlen vom Monte Generoso zum LAGEOS-Satelliten. Aktueller Forschungsbeitrag der Geodäsie und Geophysik zur globalen Geodynamik und Erdbebenforschung im Rahmen von NASA's Crustal Dynamics Project. VPK 6/86, S. 225–231.

Bürki, B., A. Geiger, H.-G. Kahle, W. Gurtner and P. Dunn (1987): The Swiss Trans-Alpine Laser-Experiment Monte Generoso–Jungfraujoch–Zimmerwald: A Short Status Report. 12th NASA's Crustal Dynamics Project Meeting, Pasadena, March 1987.

Cocard, M. (1987): Geodätische Auswertung von GPS-Messungen (im GPS-Testnetz Turtmann, Wallis). Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Bericht Nr. 129, 111 S.



Elektrooptische Distanzmessungen in der Schweiz / Alpentranse Gotthard

Geiger, A., H.-G. Kahle, D. Schneider, M. Rothacher, G. Beutler und W. Gurtner (1986): Das GPS-Testnetz Turtmann: Netzanlage und Messkampagne 1985. VPK 7/86 S. 266–271.

Geiger, A. und H.-G. Kahle (1986): Gravimetrisches Geoid der Schweiz. VKP 8/86, S. 311–323.

Geiger, A. (1987): Einfluss richtungsabhängiger Fehler bei Satellitenmessungen. Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Bericht Nr. 130, 40 S.

Geiger, A. und M. Müller (1987): Dopplermessungen für das Projekt ALGEDOP. Anwendung des U.S. Satelliten-Navigationsystems TRANSIT in der Schweiz. Teil II: Auswertung und Interpretation. Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Bericht Nr. 138, 44 S.

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

Gurtner, W. (1978): Das Geoid in der Schweiz. *Astronomisch-geodätische Arbeiten in der Schweiz*, Band 32, 103 S.

Gurtner, W. (1986): GPS-Testmessungen auf dem CERN-LEP-Kontrollnetz. VPK 6/86, S. 219–224.

Gurtner, W. und G. Beutler (1986): Die Rolle der Satellitengeodäsie in der Vermessung. VPK 8/86, S. 336–341.

Gurtner, W., G. Beutler, S. Botton, M. Rothacher, A. Geiger, H.-G. Kahle, D. Schneider and A. Wiget (1987): The Use of Global Positioning System in Mountainous Areas. Paper presented at IUGG General Assembly, Vancouver, August 1987.

Jeanrichard, F. (1986): L'état actuel de la recherche sur les mouvements de la croûte terrestre en Suisse. VPK 8/86, S. 330–336.

Kahle, H.-G., P. Cagienard, St. Müller, I. Marson und F. Chaperon (1981): Absolute Schweremessungen in der Schweiz als Basis für geodynamische Untersuchungen zur aktuellen Alpentektonik. VPK 7/81, S. 221–228.

Matthias, H. (1985): Navigation. VPK 4/85, S. 109–122.

Meier, D. und H. Aeschlimann (1986): Elektronische Distanzmessung. Rückblick und Ausblick. VPK 8/86, S. 341–345.

Müller, St. (1984): Dynamic Processes in the Alpine Arc. *Annales Geophysicae* 2, 2, S. 161–164.

Müller, St. (1986a): Tiefenstruktur, Dynamik und Entwicklung des Alpenraumes. *Vierteljahresschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich* 129, 3, S. 217–245.

Müller, St. (1986b): Grosstektonische Zusammenhänge im Alpenraum. *Neue Zürcher Zeitung, Forschung und Technik*, Nr. 197 vom 27.8.86, S. 77–78 (nach einem Referat von St. Müller am Symposium über Erdbeben in Brig, April 1986).

Rothacher, M., G. Beutler, W. Gurtner, A. Geiger, H.-G. Kahle and D. Schneider (1986): The 1985 Swiss GPS-Campaign. In: *Proceedings of 4th International Symposium on Satellite Positioning*, Austin, Texas.

Schwarz, K.-P. (ed.) (1985): *Inertial Technology for Surveying and Geodesy. Proceedings of 3rd International IMS Symposium*, Banff, Canada.

Trümpy, R. (1985): Die Plattentektonik und die Entstehung der Alpen. *Neujahrsblatt der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich*, 47 S.

Wiget, A. (1985): Inertiale Vermessungssysteme. Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Bericht Nr. 98, 108 S.

Wiget, A. (1986): Einsatz inertialer Messsysteme in der Gravimetrie. Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Bericht Nr. 110, 58 S.

Wiget, A., H.-G. Kahle und A. Geiger (1986): ALGEDOP: Ein Beitrag zur satellitengestützten Geoidbestimmung in der Schweiz. VPK 5/86, S. 177–181.

Wirth, B. (1985): Störkörperbestimmung im Gebiet der Ivrea-Zone aus gravimetrischen und astrogeodätischen Messungen. Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Bericht Nr. 93, 59 S.

Wirth, B., U. Marti und B. Bürki (1987): Lotrichtungs- und Schweremessungen in der Ivrea-Zone. Reduktion und Interpretation der Kampagnen 1983 bis 1986. Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Bericht Nr. 125, 50 S.

Wunderlin, N. (1987): Versuche zur Refraktionsbestimmung mit Hilfe der Kollokation. Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Bericht Nr. 132, 115 S.

Abkürzungen

AGU	American Geophysical Union
AIUB	Astronomisches Institut der Universität Bern
ALGEDOP	Alpine Geoid Doppler Project
ARIES	Astronomical Radio Interferometric Earth Surveying
ATAR	Akustisches Temperatur-Anzeige- und Registriergerät
CCD	Charge Coupled Device
CERN	Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire
CGS	Commission Géodésique Suisse
CHILP	Schweizerisches Komitee für das Internationale Lithosphärenprojekt
EPF(L)	Ecole Polytechnique Fédérale (de Lausanne)
ESA	European Space Agency
ETH(Z)	Eidgenössische Technische Hochschule (Zürich)
GEOS-C	Geodynamics Experimental Ocean Satellite-3
GPS	Global Positioning System
GRANIT	Schweizerische GPS-Kampagne vom Juni 1987 mit geodynamischen Zielsetzungen
IAG	International Association of Geodesy
IASPEI	International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior
ICL	Inter-Union Commission on the Lithosphere
IGN	Institut Géographique National
IGP	Institut für Geodäsie und Photogrammetrie
IMS	Inertial Measuring Systems
IUGG	International Union of Geodesy and Geophysics
LAGEOS	Laser Geodynamics Satellite
LEP	Large Electron Positron Collider
L+T	Bundesamt für Landestopographie
MEDLAS	Mediterranean Laser Project
MTLRS	Modular Transportable Laser Ranging System
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NAVSTAR	Navigation Satellite Timing And Ranging
NF	Schweizerischer Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung
RCM	Recent Crustal Movements
RETrig	Réseau Européen Trigonométrique
REUN	Réseau Européen Unifié de Nivellement
SATRAPE	Satellite Radio Positioning in Europe
SGK	Schweizerische Geodätische Kommission der SNG
SGPK	Schweizerische Geophysikalische Kommission der SNG
SLR	Satellite Laser Ranging
SNG	Schweizerische Naturforschende Gesellschaft
SST	Satellite-to-Satellite Tracking
STARLETTE	Der Satellit STARLETTE wurde 1975 durch das französische Centre National d'Etudes Spatiales (C.N.E.S.) gestartet. Er ist ein passiver Satellit, der von der Erde ausgesandtes Laserlicht reflektiert.
SWISSDOC	Swiss Doppler Observation Campaign
TRANSIT	U.S. Navy Navigation Satellite System
TU	Technische Universität
TZK	Transportable Zenitkamera
UNIFY	Relational Data Base Management System (registered trademark)
VLBI	Very Long Baseline Interferometry
VPK	Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik (Zeitschrift)
V+D	Eidgenössische Vermessungsdirektion
WEGENER	Working Group of European Geoscientists for the Establishment of Networks for Earthquake Research
3D	Dreidimensional

L'état actuel de la recherche sur les mouvements de l'écorce terrestre en Suisse

par Francis Jeanrichard

Résumé

L'article donne un aperçu succinct des travaux réalisés jusqu'à ce jour dans différentes régions de la Suisse en vue d'obtenir une image des mouvements récents de la croûte terrestre.

Zusammenfassung

Der Bericht gibt einen kurzen Überblick über die bisher ausgeführten Arbeiten in verschiedenen Regionen der Schweiz zur Gewinnung eines Bildes der rezenten Krustenbewegungen.

1. Introduction

Par *état actuel* de la recherche sur les mouvements récents de la croûte terrestre, il faut entendre l'état actuel de nos connaissances de la grandeur de ces mouvements, décelés par des mesures géodésiques effectuées durant les 80 dernières années pour le nivellement fédéral et durant les 15 dernières années environ pour les autres mesures. En plus, les résultats se limitent au territoire suisse.

Ensuite, par mouvement récent, on entend les mouvements qui se sont produits durant les 10 000 dernières années environ. Avec nos mesures, forcément limitées à l'échelle humaine, ce n'est donc qu'une très petite partie de l'histoire de ces mouvements qui est abordée.

Enfin, toutes les recherches effectuées par des méthodes géologiques telles que estimation de l'ablation ou étude des données de la géochronologie et du métamorphisme, sont laissées de côté et ne sont mentionnées que les études en cours où la géodésie joue un rôle important.

2. L'étude des mouvements locaux

On peut distinguer deux groupes de projets.

Dans le premier groupe se trouvent les projets issus du programme «Geodynamics» du «International Council of Scientific Unions», 1970. Un groupe de travail interdisciplinaire avait été formé en 1971 (Président: Dr N. Pavoni) en vue d'étudier les mouvements de la croûte terrestre en Suisse. Parmi tous les sites proposés par les géologues, quatre d'entre eux furent retenus pour une étude approfondie:

- Le décrochement de Pontarlier (Vallée de Joux) où l'on s'attend à déceler des mouvements horizontaux
- Le fossé rhénan (Région de Bâle) où l'on s'attend à déceler des mouvements verticaux
- La ligne Rhin-Rhône
- La région du Gothard (jonction du massif de l'Aar et de celui du Gothard par l'intermédiaire de la zone d'Urseren).

Dans le deuxième groupe des projets, on trouve des sites dont l'intérêt est dû à des circonstances très diverses:

a) Dans le cadre de la répétition du nivellement fédéral

- Tunnel ferroviaire du St-Gothard
- Tunnel ferroviaire du Lötschberg
- Tunnel ferroviaire du Simplon

b) Dans le cadre des travaux de la Société coopérative pour l'entreposage des déchets radioactifs (SEDRA)

Région du nord de la Suisse, comprise dans le polygone Bâle-Olten-Baden-Kaiserstuhl-Bâle

c) Dans le cadre de tests de récepteurs GPS

Réseau pilote de Tourtemagne, à cheval entre les flancs nord et sud de la vallée du Rhône

d) Dans le cadre du projet de la NASA «Crustal dynamics project»

Mesure de la distance Mte Generoso-Zimmerwald par des mesures au Laser vers le satellite LAGEOS et par des mesures terrestres, au Laser également, vers un point intermédiaire situé au Jungfraujoch. La distance a été déterminée, en sus, à l'aide de récepteurs GPS avec la collaboration des Instituts de géodésie et photogrammétrie de l'Ecole polytechnique fédérale de Zurich, d'astronomie de l'Université de Berne et de l'Université de Delft.

En plus, deux projets de l'Institut de géodésie et photogrammétrie de l'EPFZ, «Gotthardpass-Netz» et «Testnetz Gotthard», sont susceptibles à long terme de fournir des informations sur les mouvements horizontaux entre le sud et le nord du Gothard.

Pour avoir des résultats sur les mouvements d'une région, il est nécessaire d'avoir au moins deux mesures à des époques différentes. Les sites où cette condition est remplie se limitent actuellement aux régions suivantes:

- Décrochement de Pontarlier (Vallée de Joux)
- Fossé rhénan (Région de Bâle)
- Ligne Rhin-Rhône (Région du Gothard)
- Les tunnels ferroviaires (St-Gothard, Lötschberg, Simplon)
- La région du nord de la Suisse (Travaux de la SEDRA).

2.1 Décrochement de Pontarlier

A l'aplomb de Pontarlier, la chaîne jurassienne est traversée par une fracture dite «Décrochement de Pontarlier». Ce décrochement comporte un rejet de l'ordre de 3,5 km. En admettant une déformation uniforme depuis la phase de plissement pliocène jusqu'à nos jours, on obtient une vitesse de déplacement relatif de 3,5 mm en 10 ans. Au début du siècle, trois séismes ont eu lieu et leur foyer se situe à l'aplomb de la trace française du décrochement, ce qui montrerait que celui-ci est encore en activité.

Le dispositif de mesure comprend deux quadrilatères chevauchant la faille principale du décrochement. Des mesures de directions (e.q.m. $\pm 2,0^{\circ}$) et de distances au Mekometer ME 3000 (e.q.m. $\pm 1,2$ mm) ont été effectuées par l'Office fédéral de topographie dans ces quadrilatères dont les côtés et diagonales varient entre 200 m et 600 m, en 1973, 1974, 1978 et 1984.

La comparaison des différentes mesures, qui s'étend donc sur une période de 11 ans, ne montre pas de mouvements significatifs des lèvres de la faille. En effet, les différences entre les mesures ne dépassent pas 0,5 mm et, comme le positionnement relatif des points de mesure présente également une précision du $\frac{1}{2}$ mm, on doit admettre, actuellement, que cette faille est en repos.

En 1984, chaque quadrilatère a été complété par une cinquième station afin d'améliorer la stabilité et la configuration du réseau. On peut augmenter ainsi la précision de la détermination des vitesses de déplacement de 25 % à 30 %. Evidemment, on augmente aussi le nombre des mesures de 60 % environ et par conséquent, le coût des mesures augmente également.

Il faut espérer, que dans un avenir proche, les mesures à l'aide de récepteurs GPS soient opérationnelles pour résoudre les problèmes tels que ceux rencontrés dans la Vallée de Joux. Avec ce système, la servitude d'intervisibilité entre les stations disparaît et le nombre des stations pourrait être augmenté de façon à couvrir une certaine surface de part et d'autre de la faille principale pour surveiller également le réseau des failles secondaires.

2.2 Fossé rhénan

La sismicité de la région bâloise serait un indice des mouvements actuels périodiques du fossé rhénan qui atteint une profondeur d'environ 1000 m dans la région de Bâle.

L'Office fédéral de topographie et l'Office du cadastre du canton de Bâle-Ville ont collaboré à la mise en place d'un nivellement de deux lignes pratiquement perpendiculaires à la flexure rhénane, au nord de Bâle. Deux mesures ont eu lieu, l'une en 1973 et l'autre en 1980. Les différences décelées entre les deux nivellements sont de l'ordre de grandeur de la précision des mesures.

2.3 Ligne Rhin-Rhône

La ligne du Rhin au Rhône a été étudiée par les géologues MM. Eckardt, Funk et Labhart dans le cadre d'un projet financé par le Fonds national suisse de la recherche scientifique.

Cette ligne Rhin-Rhône comprend les vallées du Rhin antérieur, d'Urseren et du Rhône. Sur les flancs sud de ces vallées, on peut remarquer des failles dont le flanc aval est soulevé par rapport au flanc amont. Comme les moraines recouvrant ces failles ont été déplacées, on peut en déduire que ces mouvements sont postglaciaires et datent donc de moins de 10 000 ans. La cause de la formation de ces failles pourrait résider dans la compensation glacio-isostatique qui a suivi la fonte des glaces mais, pour certains systèmes de failles, il faut aussi admettre que des mouvements tectoniques ont joué un rôle.

La différence entre le flanc amont et le flanc aval de ces failles peut atteindre jusqu'à huit mètres de différence d'altitude et l'addition de toutes ces différences d'altitudes jusqu'au fond de la vallée peut atteindre jusqu'à 30 mètres.

L'Institut de géodésie et photogrammétrie de l'EPFZ a installé un dispositif de mesure sur 6 profils perpendiculaires aux failles situées au nord de la ligne Andermatt-Col de l'Oberalp à une altitude moyenne de 2400 m environ. Des mesures ont été effectuées en 1976, 1978, 1980 et 1982. Elles comprennent des mesures d'angles verticaux et de distances au Mekometer ME 3000, ce qui permet de déterminer les mouvements verticaux relatifs des lèvres de ces failles ainsi que leur écartement éventuel. Jusqu'ici, seuls des mouvements verticaux relatifs de l'ordre de 0,7 mm par année ont été décelés sur l'un des six profils étudiés, ce qui correspondrait assez bien aux prévisions. Mais en 1984, un examen de la stabilité des repères de ce profil au moyen d'un sismographe portable a montré que les repères amonts de ce profil sont placés sur une roche instable et les mouvements décelés pourraient n'avoir qu'une cause tout à fait locale. Les mesures de distances perpendiculaires à ces failles n'ont pas permis de déceler de variation de l'écartement des lèvres.

2.4 Région Schöllenen-Andermatt (voir fig. 1)

Les divers nivellements de cette région située entre Göschenen et Hospental ont été analysés en 1983 par E. Gubler:

- Nivellement fédéral par le col de 1918 et de 1970
- Nivellement fédéral par le tunnel de 1917 et de 1977
- Nivellement spécial dans la région des gorges des Schöllenen et d'Andermatt de 1973/74 et 1980.

L'interprétation géologique des mouvements trouvés a été faite par les géologues MM. Eckardt, Funk et Labhart.

Les caractéristiques de la tectonique de la région entre Göschenen et le col du St-Gothard sont les suivantes: la région au nord d'Andermatt fait partie du massif de l'Aar, la région située au sud de cette localité fait partie du massif du Gothard. Entre ces deux socles se trouve la zone sédimentaire d'Urseren, dont la largeur, dans la vallée d'Urseren, atteint environ 1 km.

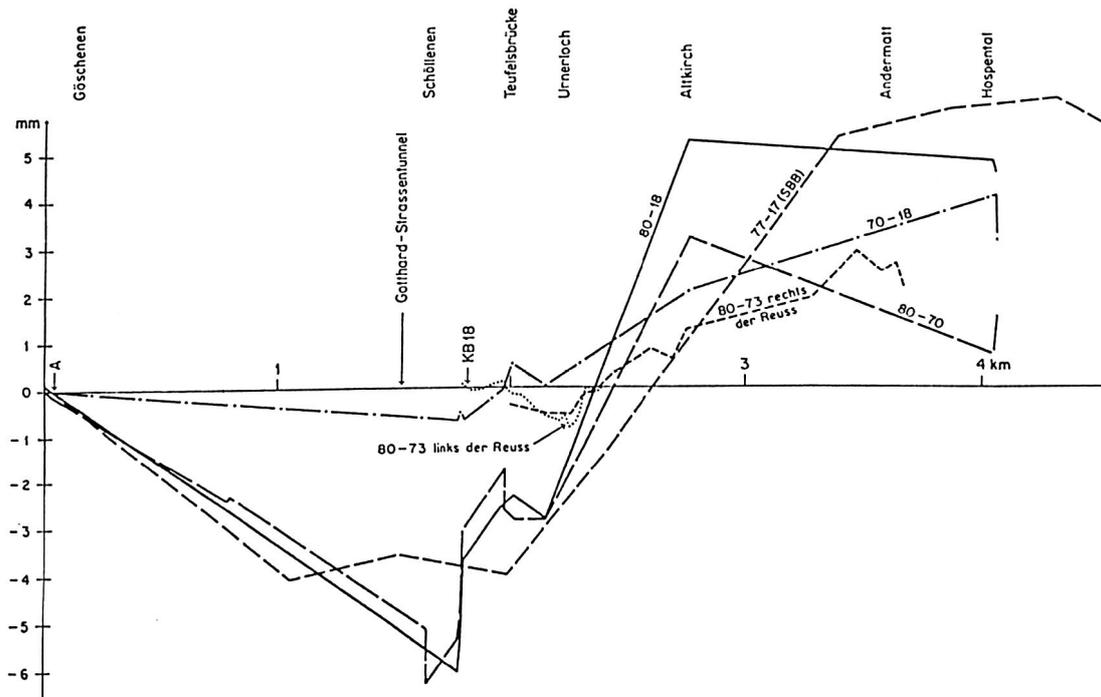


Fig. 1: Mouvements verticaux dans la région du Gothard (D'après Eckardt et al., 1983).

Toutes les mesures de nivellement montrent:

- une surrection de la zone d'Urseren par rapport au massif de l'Aar (Exemples: nivellement fédéral 1918/1970, nivellement spécial 1973/1980)
- un affaissement dans la région des Schöllenen pour les nivellements après 1970, dans le cas présent pour ceux de 1977 et 1980. On suppose qu'il y a une relation directe entre le percement du tunnel routier du St-Gothard et ces

affaissements. Le percement du tunnel aurait provoqué un drainage des failles et celles-ci se seraient resserrées, provoquant un tassement des roches entre le tunnel et la surface du terrain.

Cet exemple tend à montrer combien est difficile et délicate l'interprétation des résultats des mesures géodésiques et combien les interventions de l'homme peuvent modifier les phénomènes naturels.

TUNNEL DU GOTHARD

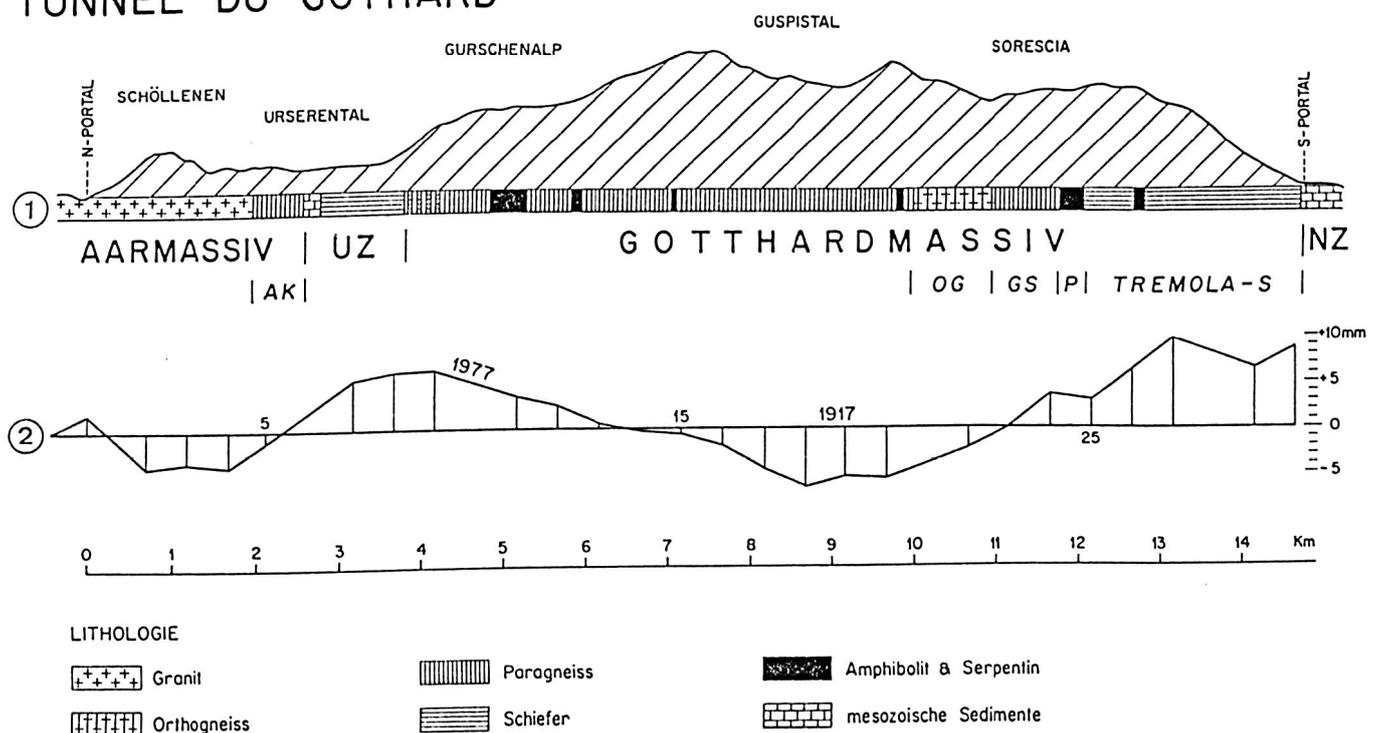


Fig. 2: Mouvements verticaux entre 1917 et 1977 (D'après Funk et Gubler, 1980).

2.5 Les tunnels ferroviaires

Les trois tunnels ferroviaires du St-Gothard, du Lötschberg et du Simplon sont inclus dans les lignes du nivellement fédéral. La période entre les anciennes et les nouvelles mesures varie entre 60 et 70 ans environ.

Pour le tunnel du St-Gothard, les nivellements ont été analysés par E. Gubler et interprétés par H. Funk, géologue (voir fig. 2).

– On retrouve, par la comparaison des mesures entre 1917 et 1977, l'affaissement provoqué probablement par le percement du tunnel routier (env. 4 mm) et une surrection de la zone d'Urseren (env. 6 mm).

– La partie nord du massif du Gothard s'affaisse et la partie sud s'élève.

D'après le géologue M. Funk, la surrection de la zone d'Urseren pourrait avoir une origine isostatique glaciaire. Par contre les mouvements du massif du Gothard ont une origine tectonique liée à une compression nord-sud.

Les mesures dans les tunnels du *Simplon* et du *Lötschberg* confirment le bombement de la vallée du Rhône par rapport au nord et au sud des Alpes (voir fig. 3 et fig. 4).

2.6 La région du nord de la Suisse

Des trois études régionales restantes (Nord de la Suisse, réseau pilote de Tourtemagne, distance Mte Generoso–Zimmerwald), seule la région du nord de la Suisse présente une possibilité de comparaison d'au moins deux mesures. Il s'agit des mesures des nivellements fédéraux de la Suisse et des nivellements de Bade-Wurtemberg le long de la rive droite du Rhin.

En résumé, les résultats sont les suivants:

- Par rapport à un repère situé à Laufenburg (sur le socle hercynien de la Forêt noire) on a décelé
 - un affaissement de 0,2 à 0,3 mm/an dans la région de Waldshut
 - une surrection de 0,1 à 0,3 mm/an dans la région de Baden/Brugg.
- Selon les géologues, cette surrection est couplée à une composante horizontale d'un mouvement vers le nord et l'on peut en déduire que la formation des montagnes jurassiennes se poursuit encore actuellement.

3. Résultats de la comparaison de nivellements fédéraux

Actuellement, une grande partie du territoire suisse est couverte par trois mesures de nivellement:

- Le nivellement de précision de la Commission géodésique suisse de 1865 à 1887
- Le nivellement fédéral de l'Office fédéral de topographie de 1903 à 1927
- La répétition de ce nivellement depuis 1943 à nos jours, atteignant environ 90 % du 1^{er} nivellement fédéral. Ce sont principalement les lignes dans le Jura, de Nyon à Bâle, qui manquent encore.

Le nivellement de la Commission géodésique suisse a été entièrement mesuré à l'aide de mires en bois. Sa précision est en général insuffisante, surtout en montagne, pour l'étude des mouvements de l'écorce terrestre. Par contre, les deux nivellements fédéraux présentent une e.q.m. de 1,4 mm/km et de 1,1 mm/km respectivement, et dès 1914, et pour toutes les lignes de montagne, seules des mires en invar ont été utilisées.

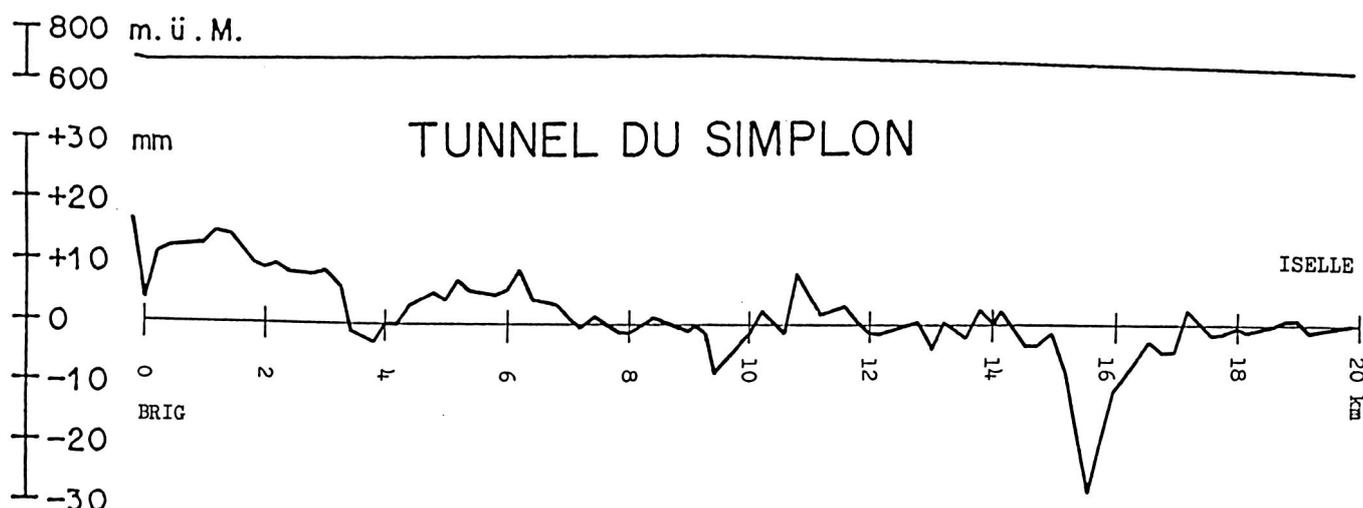


Fig. 3: Mouvements verticaux entre 1906 et 1979 (D'après Gubler, 1981).

TUNNEL DU LÖTSCHBERG

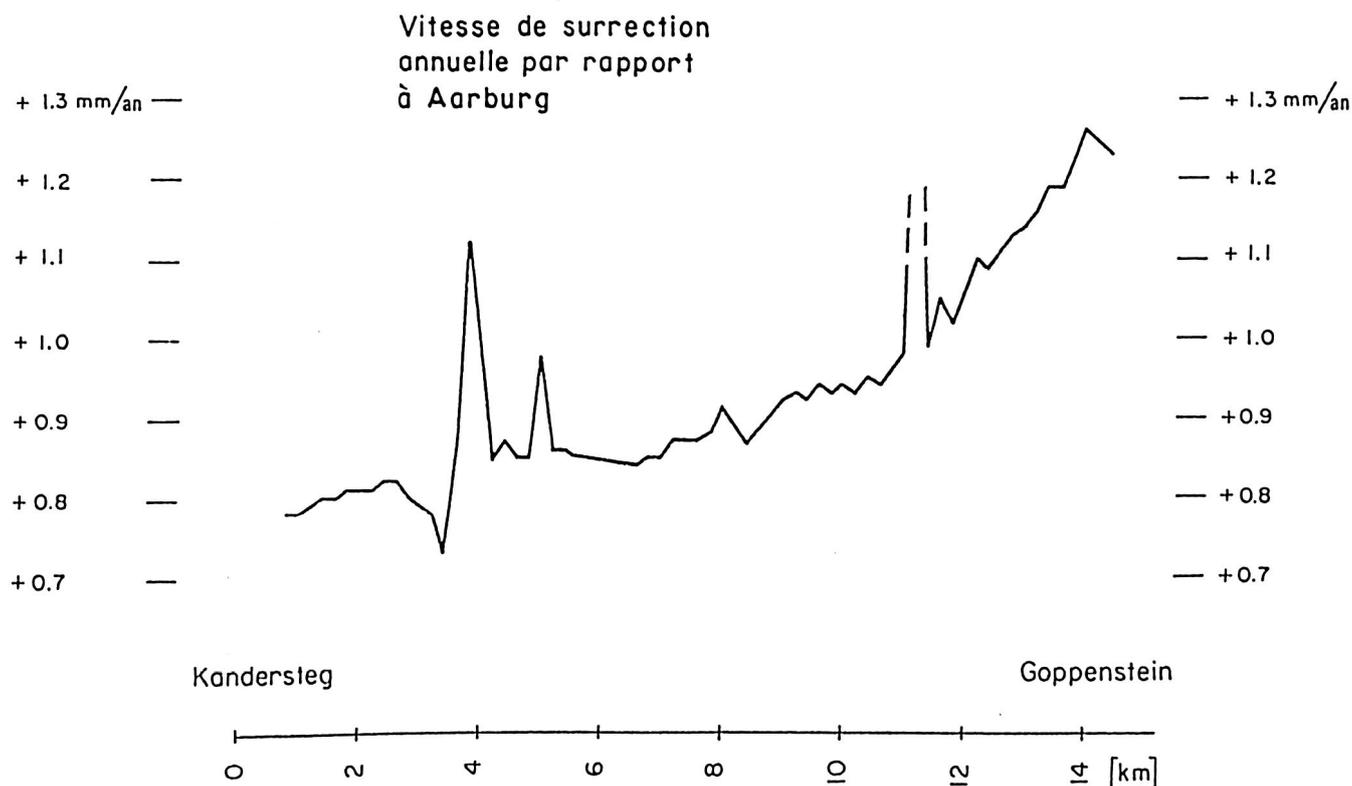


Fig. 4: Mouvements verticaux entre 1909/15 et 1982/83 (D'après Gubler et Kahle, 1984).

La méthode du nivellement présente, à l'analyse, bien des défauts:

- elle est lente, 70 à 120 stations par jour, donc 6 à 7 km par jour en plaine. D'où les efforts pour augmenter la vitesse de déplacement des équipes de mesure en les motorisant et faisant les mesures depuis un véhicule directement. D'où les essais également de remplacer le nivellement géométrique par le nivellement trigonométrique de précision.
- elle présente des erreurs systématiques:
 - enfoncement des mires
 - enfoncement du trépied portant l'instrument
 - défaut de longueur des mires et défaut de graduation
 - défaut dans le système de compensation automatique des instruments, sensibilité aux influences magnétiques
 - erreurs dues à la réfraction
 - influence des marées luni-solaires.

En bref et à première vue, une méthode peu propice à l'obtention de résultats satisfaisants. Et pourtant, en prenant certaines précautions, c'est aujourd'hui encore la méthode la plus puissante pour déterminer des différences d'altitude avec précision.

Les écarts de fermeture des mailles du 2^e nivellement fédéral

montrent que, malgré tous les défauts qu'on lui prête, la méthode fournit d'excellents résultats. Et, ce qui est très important, ceci vaut également pour la première mesure du début du siècle. Ces écarts se réduisent encore si l'on tient compte des mouvements récents de la croûte terrestre (voir tableau).

Maille	Pourtour km	observé mm	théorique mm	réduit mm	réduit* mm
IV	161	+ 2	+ 1	+ 1	0
V/VI	270	+ 2	-12	+14	+11
VII	156	+ 6	0	+ 6	+ 5
VIII/XIII	299	-26	-60	+34	- 9
IX	250	-18	+ 4	-22	-20
X	233	-18	- 6	-12	- 7
XI	257	-14	- 5	- 9	- 3
XII	220	- 1	+ 5	- 6	+ 2
XIV	211	+44	+25	+19	+28
XV	223	+ 2	+10	- 8	- 2
XVI	283	+23	+ 2	+21	+30
XVII	277	+24	- 3	+27	+28
XVIII	192	-49	-22	-27	-29
Simplon	70	+17	+14	+ 3	- 5

* en tenant compte des mouvements récents de la croûte terrestre

Tableau: Ecarts de fermeture des mailles du nivellement fédéral, 2^e mesure (1947 à 1986).

E. Gubler a effectué un calcul global des deux nivellements en introduisant comme inconnues de la compensation, non des différences d'altitudes, mais les vitesses des mouvements des repères et leur altitude à une certaine époque, en admettant que les mouvements étaient linéaires et en tenant pour invariable l'altitude d'un repère situé à Aarburg, au pied du Jura, près d'Olten.

En superposant la carte géotectonique de la Suisse à l'image des mouvements des divers repères, on constate (voir carte ci-jointe):

- que les repères situés dans le Jura et sur le bassin molassique sont pratiquement stables
- que plus on s'approche des massifs cristallins, plus un mouvement de surrection se dessine. Les maximums se trouvent dans la région de Brigue et de Coire et atteignent 1,4 mm/an. Dans le graphique figure, en plus de la vitesse de déplacement, le double de l'e.q.m. de cette vitesse.

L'e.q.m. simple atteint, à la périphérie sud et est de la Suisse, environ $\pm 0,2$ mm/an. Les vitesses de surrections des régions cristallines dépassent donc largement ces valeurs.

Remarquons également, bien que légèrement marqué, un basculement faible d'est en ouest, du Bodan au Lac Léman. Si ce mouvement continue et se confirme, on pourrait alors, dans un futur lointain, voir l'Aar se jeter dans le Léman!

Une superposition des mouvements de la croûte terrestre et celle de la carte des anomalies isostatiques de la pesanteur montre également un résultat très intéressant: là où nous avons une surrection maximum (Brigue et Coire) nous avons également une anomalie négative maximum.

La surrection des massifs cristallins peut s'expliquer de deux façons:

Ou bien la surrection actuelle des Alpes est un effet de compensation isostatique de la croûte terrestre en réaction à la subduction des couches relativement légères s'enfonçant sous la plaque eurasienne sous la poussée de la plaque africaine. Dans ce cas, l'orogénèse alpine serait pratiquement terminée.

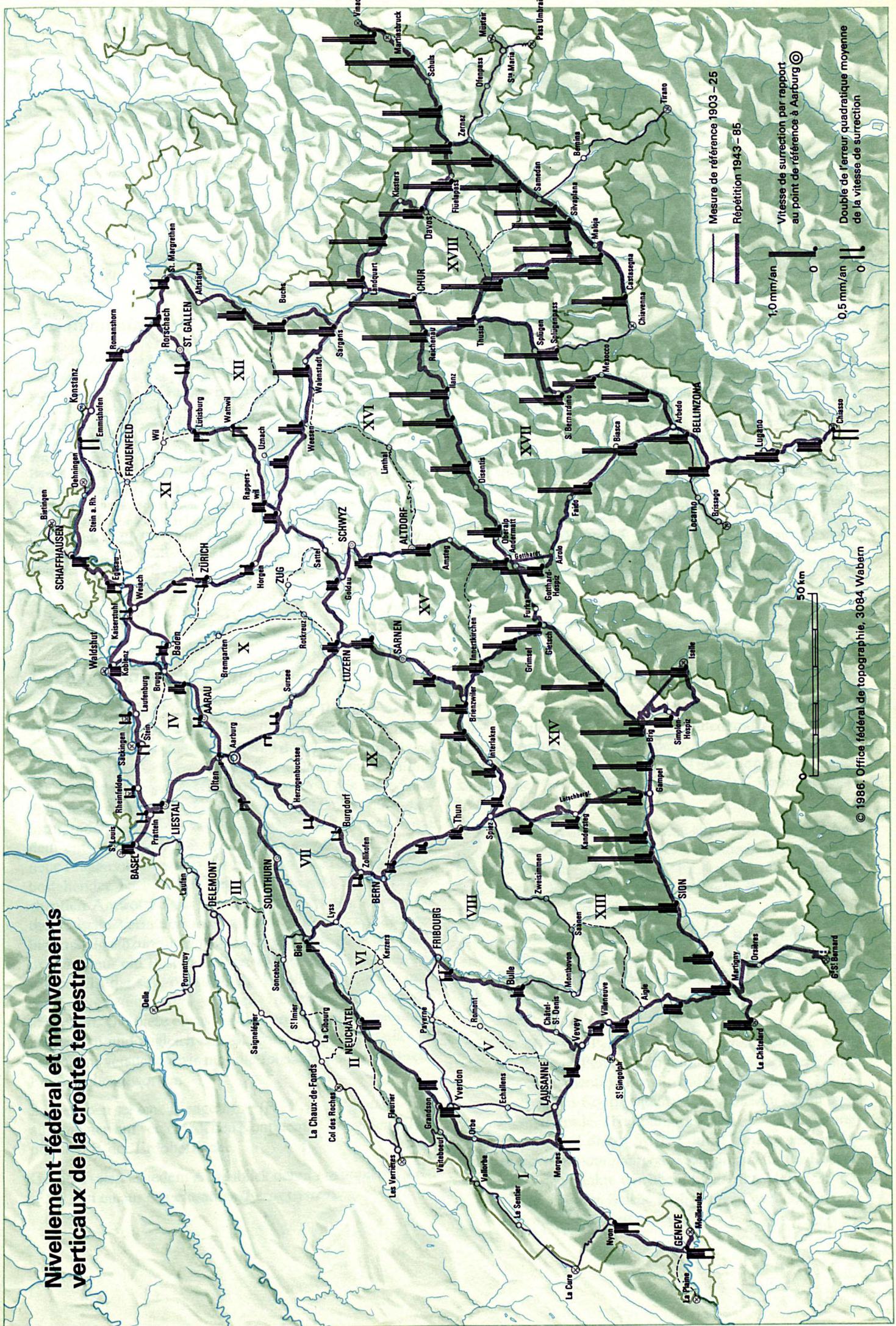
Ou bien la surrection actuelle des Alpes n'est pas d'origine isostatique, mais elle est due à la collision des plaques africaines et eurasiennes et, dans ce cas, il faut s'attendre à déceler un raccourcissement sud-nord de la Suisse d'environ 3 mm/an et à une surrection durable du Jura plissé, du bassin molassique et des Alpes.

La détection d'une éventuelle contraction sud-nord de la Suisse à l'aide de mesures géodésiques prend donc une importance considérable aujourd'hui.

Bibliographie

- Atlas de la Suisse, 2^e édition, feuille 10b** 'Gravité, séismicité, géothermie', Office fédéral de topographie, 1984.
- Aubert D., 1982. Fenêtres et écailles tectoniques à la Vallée de Joux. Bulletin de la Société vaudoise des sciences naturelles, vol. 76, fasc. 2.
- Eckardt P., Funk H., Labhart T., mit Beiträgen von Fischer W. und Gubler E., 1983. Postglaziale Krustenbewegungen an der Rhein-Rhone-Linie. Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik 2/83.
- Fischer W., Kahle H.-G., 1982. Der Schweizerische Arbeitskreis Geodäsie/Geophysik. Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik 12/82.
- Funk H., Gubler E., 1980. Höhenänderungen der Fixpunkte im Gotthard-Bahntunnel zwischen 1917 und 1977 und ihre Beziehung zur Geologie. Eclogae geol. Helv., vol. 73/2, 583-592.
- Gubler E., 1976. Beitrag des Landesnivellements zur Bestimmung vertikaler Krustenbewegungen in der Gotthard-Region. Schweiz. mineral. petrogr. Mitteilungen 56, 1976.
- Gubler E., 1981. Höhenänderungen im Simplongebiet. Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik 12/81.
- Gubler E., Kahle H.-G., Klingelé E., Müller St. and Olivier R., 1981. Recent crustal movements in Switzerland and their geophysical interpretation. Tectonophysics 71, 1981.
- Gubler E., 1984. Die Bestimmung rezenter Krustenbewegungen mit Hilfe von Präzisionsnivellements – Ein Überblick. Vermessungswesen und Raumordnung, Heft 2, März 1984.
- Gubler E., Kahle H.-G., 1984. Recent crustal movements and geophysical interpretation of geodynamic processes in the alpine mountain belt. Paper presented at the 5th International Symposium «Geodesy and Physics of the Earth», Magdeburg, September 1984.
- Gubler E., Schneider D., Kellerhals P., 1984. Bestimmung von rezenten Bewegungen der Erdkruste mit geodätischen Methoden. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Technischer Bericht 84-17, Juni 1984.
- Jeanrichard F., 1973. Nivellement et surrection actuelle des Alpes. Mensuration, Photogrammétrie, Génie rural 1-73.
- Jeanrichard F., 1974. Essais de mesure géodésique des mouvements horizontaux de la croûte terrestre. Mensuration, Photogrammétrie, Génie rural 3-74.
- Kobold F., 1977. Die Hebung der Alpen aus dem Vergleich des «Nivellement de Précision» der Schweizerischen Geodätischen Kommission mit den Landesnivellements der Eidgenössischen Landestopographie. Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik 4-77.
- Müller St., Lowrie W., 1980. Die geodynamische Entwicklung des westlichen Mittelmeerraumes und der Alpen. Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik 12/80.
- Schaer J-P., Jeanrichard F., 1974. Mouvements verticaux anciens et actuels dans les Alpes suisses. Eclogae geol. Helv., vol. 67/1, 101-119.
- Schneider D., 1985. 3D-Testnetz Turtmann, Bericht und Vorschlag an die Arbeitsgruppe SATRAPE. Bundesamt für Landestopographie, Oktober 1985.
- Zölly H., 1948. Geschichte der geodätischen Grundlagen für Karten und Vermessungen in der Schweiz. Verlag Bundesamt für Landestopographie, Wabern, 1948.

Nivellement fédéral et mouvements verticaux de la croûte terrestre



© 1986. Office fédéral de topographie, 3084 Wabern

Die Satellitengeodäsie im Dienste der globalen Geodynamik

von Ivo Bauersima

Zusammenfassung

Durch die Art seines Aufbaus richtet sich dieser Artikel an jene Leser, die der Satellitengeodäsie und der globalen Geodynamik, aus welchen Gründen auch immer, noch skeptisch gegenüberstehen. Er stellt nämlich einen Versuch dar, am Beispiel der Suche nach einem Lösungsschema für eine globale, rein geodätische Aufgabe die Unvermeidbarkeit satellitengeodätischer und in der Folge auch geodynamischer Betrachtungen nachzuweisen. Es zeigt sich dabei, dass dieses Lösungsschema im empirischen Bereich noch durch andere Beobachtungsmethoden wie VLBI und Laserentfernungsbeobachtungen zum Mond wertvoll *ergänzt* werden kann. Nicht umsonst wird der bisherige, aus lauter astrometrischen Stationen bestehende Zeit- und Polschwankungsdienst ab 1988 durch einen lediglich aus VLBI- (Very Long Baseline Interferometry), SLR- (Satellite Laser Ranging) und LLR- (Lunar Laser Ranging) Stationen bestehenden «International Earth Rotation Service» ersetzt.

Résumé

Par sa disposition, cet article s'adresse à des lecteurs encore sceptiques pour différentes raisons vis-à-vis de la géodésie par satellites et la géodynamique globale. Il présente notamment un essai tentant de prouver la nécessité d'introduire des considérations provenant de la géodésie par satellites puis de la géodynamique pour la solution d'un problème global et purement géodésique. Il apparaît alors que ce schéma de solution dans le domaine empirique peut être *complété* par d'autres méthodes d'observation telles que l'interférométrie sur longues bases (VLBI) et la mesure de distances avec un laser vers la lune. En conséquence, le Service de l'Heure et du Mouvement du Pôle qui se référait jusqu'à présent uniquement à des stations astrométriques est remplacé dès 1988 par un «Service International de la Rotation Terrestre» (IERS) ne se basant que sur des stations existantes équipées pour des observations VLBI (Very Long Baseline Interferometry), SLR (Satellite Laser Ranging) et LLR (Lunar Laser Ranging).

1. Eine geodätische Aufgabe

1. Im Titel dieses Artikels kommen zwei Begriffe vor, die «Geodäsie» und die «Geodynamik». Während ich annehmen darf, dass der Inhalt des ersteren dem Leser ausreichend bekannt ist, wäre es angebracht, mit einer knappen Definition des letzteren diesen Artikel zu eröffnen. Dies wäre aber didaktisch nicht klug. Denn neue Fachgebiete entstehen nicht, indem man sie zunächst definiert und erst danach mit dem entsprechenden «Stoff» ausfüllt, sondern indem man neue Fragen zu beantworten versucht, die im Rahmen bereits bestehender Fachgebiete aufgestellt wurden. Die entsprechenden Antworten und das zu ihnen führende empirisch-theoretische Verfahren sind dann der «Stoff», der fachgebietsmässig einzuordnen ist. In diesem Sinne hätte die Geodynamik nur ein Bestandteil der Geodäsie sein können (so wie es z.B. die sog. physikalische Geodäsie ist), hätte man nicht bereits eine «vorgefasste» Definition der letzteren akzeptiert. Um diese etwas bewusst provokative Behauptung zu belegen und zugleich eine Skizze der «Geodynamik» zu gewinnen, versuchen wir nun die folgende rein geodätische Frage zu beantworten:

2. Gegeben sei eine Menge $M := \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ von n – im allgemeinen auf verschiedenen Kontinenten liegenden – Fixpunkten P_i der Erdoberfläche.

Gesucht seien zu jedem Augenblick deren Positionen $\vec{R}_1, \vec{R}_2, \dots, \vec{R}_n$, in einem gemeinsamen *Bezugssystem*.

2. Das erdfeste Bezugssystem

3. Unter einem *Bezugssystem* verstehen wir dabei eine Klasse *aller* Koordinatensysteme, die sich aufeinander zeitunabhängig transformieren. Da wir zugleich annehmen, der physikalische Raum sei euklidisch, beinhaltet jedes Bezugssystem auch kartesische (= geradlinige orthogonale) Koordinatensysteme.

4. Ein Bezugssystem ist also durch ein (in unserem Fall dreidimensionales) kartesisches Koordinatensystem eindeutig bestimmt. Damit findet auch die im Abschnitt 2. eingeführte Bezeichnung \vec{R}_i (= Radiusvektor) für die Position des Fixpunktes P_i ihre Rechtfertigung.

5. a) Der dreidimensionale Euklidische Raum wird auf die bekannte Weise durch einen Nullpunkt P_0 und drei linear unabhängige Vektoren $\vec{e}_i := \vec{P}_0 \vec{P}_i, i = 1, 2, 3$ – die sog. Basis – und damit durch *vier nichtkomplanare* Punkte P_0, \dots, P_3 eindeutig generiert.

b) Sei $M := \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ eine – *mindestens vier nichtkomplanare* Punkte P_i enthaltende – Menge der Punkte des dreidimensionalen Euklidischen Raumes. Da ein kartesisches Koordinatensystem in diesem Raum sechs Freiheitsgrade (Nullpunktposition + Orientierung) besitzt, wird dieses System durch genau *sechs widerspruchsfreie unabhängige* Bedingungen für die Koordinaten der Punkte der oben definierten Menge M *eindeutig definiert*. Solche Bedingungen werden dann die *Systembedingungen* genannt.

c) Enthält M nur drei nichtkolineare Punkte, so ist diese Definition vierdeutig, wie man sich am Beispiel der Systembedingungen $(x_1, y_1, z_1) := (0, 0, 0)$, $(y_2, z_2) := (0, 0)$, $z_3 := 0$ für drei nichtkolineare Punkte $P_i \equiv (x_i, y_i, z_i)$, $i = 1, 2, 3$ überzeugen kann. Durch diese Bedingungen wird nämlich nur der Nullpunkt, die xy -Ebene und die $+x$ -Achse definiert.

Wählte man anstelle der letzten drei Bedingungen $(y_2, z_2) := (0, 0)$, $z_3 := 0$ die drei Bedingungen $(x_2, y_2, z_2) := (a, 0, 0)$, so wären dann die sechs Systembedingungen nicht widerspruchsfrei. Denn aus diesen folgt, dass $\overline{P_1 P_2} = |\overline{R_1} - \overline{R_2}| = a$, was verständlicherweise nicht gelten muss. Im allgemeinen kann gesagt werden, dass die Systembedingungen genau dann widerspruchsfrei sind, wenn sich aus ihnen keine koordinateninvarianten (d.h. geometrischen) Relationen zwischen den Fixpunkten P_1, \dots, P_n ableiten lassen.

6. Das im Abschnitt 2. erwähnte Bezugssystem wird – wie jedem Geodäten vertraut – durch die Fixpunkte $P_i \in M$ (siehe 5. b)) selbst festgelegt, indem diese in der Natur versichert werden, ein kartesisches Koordinatensystem gemäss 5. b) definiert wird (beachte 4.) und die Positionen \overline{R}_i der Punkte P_i – im allgemeinen als Funktionen der Zeit – in diesem Koordinatensystem aus geodätischen Messungen ermittelt und zusammen mit deren mittleren Fehlern katalogisiert werden.

7. Die im letzten Abschnitt erwähnte Ermittlung der Positionen \overline{R}_i der Fixpunkte P_i kommt zustande, indem die – den geodätischen Messungen entsprechenden – Verbesserungsgleichungen in den unbekanntem Koordinaten dieser Fixpunkte aufgestellt und zusammen mit den in 5. b) erwähnten sechs Systembedingungen nach der Methode der kleinsten Quadrate aufgelöst werden.

Dieses Verfahren wird epochenweise angewandt (indem jeweils Daten aus nur einem «maximal zulässigen» Zeitintervall in einem Guss verarbeitet werden), wenn die Form der analytischen Darstellung der Fixpunktbewegungen von vornherein nicht bekannt ist. Sonst aber werden diese Bewegungen durch plausible analytische Ansätze in den Verbesserungsgleichungen berücksichtigt, wodurch sich dann die epochenweisen Auswertungen erübrigen.

Bemerkung: Der Begriff «Fixpunkt» könnte, angesichts der Tatsache, dass wir seine Position als Funktion der Zeit betrachten, als unangebracht erscheinen. Wir sprechen aber auch über «Fixsterne», obwohl wir über ihre Eigenbewegungen keine Zweifel hegen. Das Bestimmungswort «fix» soll im Falle terrestrischer Punkte nur die Tatsache hervorheben, dass es sich um Punkte des festen Teils der Erde, konkret der Erdkruste, handelt.

8. Die Festlegung eines Bezugssystems ist insofern nur eine Konvention, als die dieses System definierenden Systembedingungen (siehe 5. b)) beliebig sind. Denn der eigentliche Informationsgehalt, der in einer Fixpunktmenge $M = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ «verborgen» ist, besteht ausschliesslich aus allen unabhängigen *koordinateninvarianten* – d.h. geometrischen – Relationen zwischen diesen Fixpunkten. Diese Relationen entsprechen den sog. Observablen (Distanzen oder Winkel im Fixpunktnetz), solange es sich nur um terrestrische geodätische Messungen handelt.

9. Die Menge aller *unabhängigen* koordinateninvarianten – d.h. geometrischen – Relationen zwischen den Fixpunkten P_1, P_2, \dots, P_n werden wir «anschaulich» die *Konfiguration* dieser Fixpunkte nennen (siehe 8.).

10. Dass die Konfiguration eines Fixpunktnetzes üblicherweise nicht durch Katalogisierung der ihr äquivalenten koordinateninvarianten Relationen, sondern der Koordinaten der Fixpunkte erfasst wird, hat zwei Gründe:

a) Die die Konfiguration des Fixpunktnetzes eindeutig und widerspruchsfrei definierende Menge geometrischer Relationen ist nicht eindeutig bestimmt (ein Dreieck kann z.B. durch drei Seiten oder eine Seite und zwei Winkel usw. eindeutig und widerspruchsfrei gegeben werden).

b) Die Koordinaten der Fixpunkte stellen im Gegensatz zu den koordinateninvarianten Relationen eine homogene, d.h. von der Gestalt des Fixpunktnetzes formal unabhängige Information dar. Damit gestaltet sich auch die Katalogisierung von Änderungen des Fixpunktnetzes (z.B. seine Erweiterung) ohne zusätzliche Probleme.

Das einzige, was wir von einem Koordinatensystem verlangen, ist, dass es *zweckmässig* wird. Ein zweckmässiges Koordinatensystem ist dann jenes, das uns eine möglichst schnelle und praxisorientierte Handhabung des Koordinatenkatalogs erlaubt. Dies wird dann der Fall sein, wenn die katalogisierten Koordinaten der «Fixpunkte» – im allgemeinen als Funktionen der Zeit – möglichst kleine zeitliche Änderungen aufweisen werden. Lässt man sich bei der Aufstellung der Systembedingungen (siehe 5. b)) durch diese Forderung leiten, so spricht man über ein «*erdfestes*» oder «*fixsternfestes*» oder «*quasarenfestes*» Bezugssystem, je nach dem, ob terrestrische Fixpunkte oder Fixsterne oder Quasare für seine Festlegung (siehe 6. und 7.) benutzt wurden.

11. So lautet dann eine plausible Definition eines erdfesten Bezugssystems wie folgt:

$$\text{Seien } \overline{R}_i = \overline{R}_i(t) = \overline{OP}_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

die Radiusvektoren der in 2. erwähnten Fixpunkte P_i ($O = \text{Nullpunkt}$) im Augenblick t .

Die das erdfeste Bezugssystem definierenden Systembedingungen (siehe 5. b)) lauten dann:

$$\sum_i \partial_o \overline{R}_i = 0, \quad \sum_i \overline{R}_{i0} \times (\partial_o \overline{R}_i) = 0, \quad (2)$$

$$\text{wobei } \overline{R}_{i0} = \overline{R}_i(t_0) \quad (3)$$

$$\text{und } \partial_o = \partial / \partial t \quad (4)$$

die im erdfesten Bezugssystem operierende zeitliche Ableitung ist.

Die diese Ableitung definierende Eigenschaft lautet also:

$$\partial_o \hat{e}_i = 0, \quad i = 1, 2, 3, \quad (5)$$

wobei \hat{e}_i die Basisvektoren der orthonormierten Basis des erdfesten Koordinatensystems sind.

12. Man wähle nun den Nullpunkt O so, dass:

$$|\overline{R}_i| \cong R = \text{mittlerer Erdradius}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (6)$$

Die Systembedingungen (2) drücken dann – im lockeren Sprachgebrauch – den folgenden Sachverhalt aus:
Die Gesamtheit der Fixpunkte P_i weist gegenüber dem erdfesten Bezugssystem keine Translations- und Rotationsbewegung auf.

13. In der Tat, während die erste Behauptung aus (2) evident wird, ist $\vec{R}_{i0} \times (\partial_0 \vec{R}_i)$ nichts anderes als das Zweifache der im erdfesten Bezugssystem relativ zu seinem Nullpunkt O beobachteten Flächengeschwindigkeit des Punktes P_i . Diese ist proportional der im erdfesten Bezugssystem relativ zu O beobachteten Winkelgeschwindigkeit $\vec{\omega}_i$ des Punktes P_i , d.h.

$$\vec{R}_{i0} \times (\partial_0 \vec{R}_i) = R_{i0}^2 \vec{\omega}_i.$$

Unter der Annahme (6) ist aber

$$R_{i0}^2 \cong R^2.$$

Damit kann dann (2)₂ in der Form

$$\sum_i \vec{\omega}_i = 0$$

geschrieben werden, womit die am Schluss von 12. aufgestellte Behauptung präzisiert wurde.

14. Seien nun \vec{R}_i^0 die Näherungswerte von \vec{R}_i (siehe 2.) und $\vec{R}_i = \vec{R}_i^0 + \Delta \vec{R}_i$, $\vec{R}_{i0} = \vec{R}_{i0}^0 + \Delta \vec{R}_{i0}$. (7)

Setzt man dies in die Systembedingungen (2) ein und vernachlässigt alle Terme zweiter Ordnung in $\Delta \vec{R}_i$ und $\Delta \vec{R}_{i0}$, ergibt sich:

$$\sum_i \partial_0 (\Delta \vec{R}_i) = 0, \quad \sum_i \vec{R}_i^0 \times \partial_0 (\Delta \vec{R}_i) = 0.$$

Integriert man dies über t in den Grenzen t_0 und t setzt

$$\sum_i \Delta \vec{R}_{i0} = 0, \quad \sum_i \vec{R}_i^0 \times \Delta \vec{R}_{i0} = 0, \quad (8)$$

erhält man die den Bedingungen (2) – bis auf additive Vektor-konstanten, deren Wahl durch die Annahme (8) getroffen wurde – äquivalente *Systembedingungen* in der Form:

$$\boxed{\sum_i \Delta \vec{R}_i = 0, \quad \sum_i \vec{R}_i^0 \times \Delta \vec{R}_i = 0} \quad (9)$$

In dieser Form werden sie dann im Rahmen des entsprechenden Auswerteverfahrens (siehe 7.) auch benutzt.

15. Müssen die Werte \vec{R}_i^0 (siehe 14.) oder die Menge der Fixpunkte P_i gezwungenermaßen von Zeit zu Zeit geändert werden, so taucht dabei die Frage auf, welche Konsequenzen dies für die Festlegung des erdfesten kartesischen Koordinatensystems hat. Werden diese Änderungen durch entsprechende Änderungen der rechten Seite der Systembedingungen (9) so «aufgefangen», dass dadurch die «Kontinuität» der Bewegung des erdfesten Koordinatensystems im Raume nicht tangiert wird (was nur sagen will, dass die neuen Systembedingungen an der «Schnittstelle» t das gleiche kartesische Koordinatensystem «generieren» wie die alten), so werden die Näherungswerte \vec{R}_i^0 die «konventionellen Positionen» der Zeitperiode (t_1, t_2) genannt. t_1 und t_2 sind dabei zwei nacheinander folgende «Schnittstellen», d.h. Epochen der erwähnten Änderungen (näheres zu dieser heiklen Frage siehe Bauersima, 1980).

Angesichts der Tatsache, dass es uns in der Geodäsie *schlussendlich* nur um die Konfiguration (siehe 9.) des Fixpunktnet-

zes und in der Geodynamik nur um die (koordinateninvarianten) Parameter eines bestmöglichen Erdmodells geht (Bauersima, 1986a, b), darf die Bedeutung der Systembedingungen oder der zuvor definierten konventionellen Positionen *nicht* überbewertet werden. Sie sind nur ein Instrument und haben mit der Geometrie oder der Physik nichts zu tun.

3. «Geometrische» Satellitengeodäsie

16. Bei der Aufstellung der globalen geodätischen Aufgabe (siehe 2.) wurde betont, die Punkte P_i befänden sich auf verschiedenen Kontinenten. Damit ist die gegenseitige Sichtbarkeit dieser Punkte im allgemeinen nicht gewährleistet. Die Aufgabe kann daher durch *rein geometrische Auswertungen der geodätischen Beobachtungen* nur dann gelöst werden, wenn zusätzliche Hilfspunkte S_k , $k = 1, 2, \dots$, die *gleichzeitig* von mehreren Fixpunkten P_i aus beobachtet werden können, dem Fixpunktnetz zugefügt werden. Es dürfte heute kaum jemanden überraschen, dass mit diesen Hilfspunkten die künstlichen Erdsatelliten gemeint sind (und übrigens kaum etwas anderes gemeint werden könnte).

17. Im folgenden werden wir einfachheitshalber nur die Laserentfernungsbeobachtungen zu Satelliten (SLR) betrachten.

Nehmen wir an, von den Fixpunkten P_i einer Teilmenge $A = \{P_1, P_2, \dots, P_a\}$ der Fixpunktmenge M (siehe 2.) werden *gleichzeitig* die Entfernungen

$$r_k^i = \overline{P_i S_k} = |\vec{\rho}_k - \vec{R}_i| \quad (10)$$

zum Satelliten S_k beobachtet,

$$\text{wobei } \vec{\rho}_k = \overline{O S_k}, \quad \vec{R}_i = \overline{O P_i}. \quad (11)$$

Die a Beobachtungsgleichungen (10) enthalten dann $3 \cdot a$ unbekannte Koordinaten der Fixpunkte P_i (Komponenten der Radiusvektoren \vec{R}_i) und drei unbekannte Koordinaten des «Satellitenpunktes» S_k (Komponenten des Radiusvektors $\vec{\rho}_k$).

Werden insgesamt b solche gleichzeitige Beobachtungen zu b *verschiedenen* Satellitenpunkten (ein Satellit zu verschiedenen Zeiten oder mehrere Satelliten im allgemeinen zu verschiedenen Zeiten) durchgeführt, so entstehen

a · b Beobachtungsgleichungen (10)

für

3 · (a + b) unbekannte Koordinaten

der Fixpunkte P_i , $i = 1, 2, \dots, a$ und der Satellitenpunkte S_k , $k = 1, 2, \dots, b$.

Den erwähnten a · b Beobachtungsgleichungen (10) müssen noch die das erdfeste Koordinatensystem definierenden sechs Systembedingungen (9) zugefügt werden.

18. Die Systembedingungen müssen jedoch – im gegenwärtigen Stadium unserer Ausführungen – nur für die Koordinaten der Punkte der Teilmenge (siehe 17. und 2.)

$$A = \{P_1, P_2, \dots, P_a\} \subset M$$

aufgestellt werden. Solche Systembedingungen spielen dann «nur» die Rolle der das sonst singuläre System der Beobachtungsgleichungen (10) «regularisierenden» *Zusatzbedingungen*

gen. Dies allerdings nur unter der Voraussetzung, dass die Teilmenge A mindestens vier nichtkomplanare Punkte enthalte (beachte Abschnitt 5.). Ist diese Voraussetzung nicht erfüllt, so bleibt auch das vollständige System der Beobachtungsgleichungen (10) und der sechs Anfangsbedingungen singulär. Dem erwähnten Gleichungssystem müssen dann noch weitere Systembedingungen zugefügt werden.

19. Unter der Voraussetzung, dass die Teilmenge A (siehe 18.) mindestens vier *nichtkomplanare* Punkte enthalte (und wir nehmen dies einfachheitshalber auch im folgenden immer an), stellen wir fest, dass eine *rein geometrische Lösung* der globalen geodätischen Aufgabe im Falle $M \equiv A$ mittels der in 17. definierten gleichzeitigen Entfernungsbeobachtungen zu Satelliten genau dann – im Sinne der Methode der kleinsten Quadrate – eindeutig ist, wenn

$$3(a+b) \leq ab+6$$

oder

$$b \geq \frac{3(a-2)}{a-3}, \quad a \geq 4. \quad (12)$$

Hieraus folgt

$$\left. \begin{array}{l} a: = 4 \rightarrow b \geq 6 \\ a: = 5 \rightarrow b \geq 5 \\ a: \geq 6 \rightarrow b \geq 4 \end{array} \right\} \quad (13)$$

Um also die Konfiguration (siehe 8. und 9.) der Fixpunkte einer Teilmenge A (siehe 18.) durch *gleichzeitige* Beobachtungen der Entfernungen $\overline{P_i S_k}$ ($i = 1, 2, \dots, a$; $k = \text{konst}$) zu «Satellitenpunkten» S_k eindeutig bestimmen zu können, müssen Beobachtungen zu mindestens b *Satellitenpunkten* S_k , $k = 1, 2, \dots, b$ (S_k ist ein Satellit zu verschiedenen Zeiten oder verschiedene Satelliten), wobei b durch (12) oder (13) gegeben ist, durchgeführt werden.

20. Sei M die in 2. definierte Menge.

Um die Konfiguration (siehe 9.) aller Punkte der Menge M eindeutig bestimmen zu können, muss jede der in 17. (am Beispiel der Teilmenge A) beschriebenen Teilmengen

$$A_s \subset M, \quad s = 1, 2, \dots, u \quad (14)$$

und jede mit M nicht identische Vereinigungsmenge

$$A := A_{t_1} \cup A_{t_2} \cup \dots \cup A_{t_i} \neq M \quad (15)$$

dieser Teilmengen mindestens vier nichtkomplanare Punkte mit einer anderen dieser Teilmengen teilen, d.h.

$$\forall s, \exists r \neq s: A_s \cap A_r \supset \{P_{i_1}, \dots, P_{i_4}\} \quad (16_1)$$

und

$$\forall A, \exists A_s \subset A: A \cap A_s \supset \{P_{k_1}, \dots, P_{k_4}\}, \quad (16_2)$$

wobei

sowohl P_{i_1}, \dots, P_{i_4} als auch P_{k_1}, \dots, P_{k_4} nichtkomplanar (16₃) sind und A durch (15) gegeben ist.

Zusätzlich muss noch sein (beachte (14)):

$$M = A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup A_u. \quad (17)$$

21. In der Tat: Für die – in (16₁) definierten – Punkte P_{i_1}, \dots, P_{i_4} können sechs Systembedingungen aufgestellt werden

(beachte (16₃) und 5. b)). Somit können die Koordinaten aller Punkte der Menge $A = A_s \cup A_r$ (gemäss 7.) in einem gemeinsamen Koordinatensystem bestimmt werden. Da nun A identisch mit einer der durch (15) definierten Vereinigungsmengen ist, folgt aus (16₂) und (17) durch vollständige Induktion, dass die Koordinaten aller Punkte der Menge M in einem gemeinsamen Koordinatensystem bestimmt werden können.

Die Menge $\{\vec{R}_1, \vec{R}_2, \dots, \vec{R}_n\}$ der Spaltenmatrizen \vec{R}_i der Koordinaten der Punkte $P_i \in M = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ in einem gemeinsamen Koordinatensystem ist aber der *Konfiguration* dieser Punkte äquivalent.

Damit ist die in 20. aufgestellte Behauptung bewiesen.

22. Um überhaupt die globale geodätische Aufgabe (siehe 2.) mit *rein geometrischen Mitteln* (Bedingung gleichzeitiger Beobachtungen) lösen zu können, müssen Satelliten beobachtet werden, deren Flughöhen «nicht allzu klein» sind. Diese werden durch die folgenden Bedingungen festgelegt:

- durch die Forderung der Aufgabe, die Punkte P_i befänden sich auf verschiedenen Kontinenten,
- durch die Bedingungen (16₁) und (16₂) und
- durch die Bedingung praktischen Ursprungs, die Entfernungsmessung zum Satelliten erfolge nur dann, wenn sich dieser mehr als 30° über dem örtlichen Horizont befindet.

Zieht man diese drei Bedingungen in einer einfachen Berechnung in Betracht, so ergibt sich für «eine günstige Satellitenflughöhe», dass diese möglichst gross – d.h. grösser als die Flughöhe geostationärer Satelliten (Bahnradius = 42 160 km) – sein sollte.

23. Dies ist auch einer der Gründe dafür, warum die VLBI-Beobachtungen für eine *rein geometrische* Bestimmung der Konfiguration eines interkontinentalen Netzes am besten geeignet sind.

Um dies zu verdeutlichen, halte man sich die folgende «Charakterisierung» der VLBI-Beobachtungen vor Augen:

Der Quasar ist ein unendlich entfernter «Satellit», der das «Echo» im Mikrowellenbereich selbst «erzeugt». Dabei prägt er dem «Echo» eine zeitliche Struktur auf, die dieses «Echo» in den Aufzeichnungen der Quasarstrahlung an verschiedenen VLBI-Stationen eindeutig erkennen lässt. Da die tägliche Parallaxe eines Quasars (im Gegensatz zum Erdsatelliten) a priori gleich Null ist und da alle VLBI-Stationen die Ankunftszeiten der gleichen Wellenfront beobachten, kommt es dann nur auf die «Echo»-Laufzeitdifferenzen an.

24. Vergessen wir nicht, dass wir in diesem Artikel die Zwänge aufdecken wollen, die die Unvermeidbarkeit geodynamischer Betrachtungen für die Lösung rein geodätischer Aufgaben (siehe 2.) nachweisen sollen.

Vorläufig tauchte aber kein solcher Zwang auf, und die in 23. erwähnten VLBI-Beobachtungen scheinen sogar solche Zwänge – vom Prinzip her – einmal für immer auszuschliessen. Abgesehen davon, dass es kaum denkbar wäre, in jedem Punkt der Menge M (siehe 2.) eine VLBI-Station zu installieren (ein praktischer Zwang), bestehen auch theoretische Gründe dafür, an Satellitenbeobachtungen festzuhalten. Diese Gründe werden erst aus späteren Ausführungen ersichtlich.

25. Bei der Suche nach den in 24. erwähnten Zwängen fangen wir mit den harmlosesten an. Diese tauchen auf, wenn wir versuchen, die in 16. und 19. auftretenden Begriffe «gleichzeitige Beobachtungen» und «rein geometrische Auswertung» zu präzisieren.

Gleichzeitige Laserentfernungsbeobachtungen zu einem Satellitenpunkt (siehe 19.) können z.B. so aufgefasst werden, dass die Laserpulse aus allen Fixpunkten P_i der Teilmenge A (siehe 17.) *zur gleichen Zeit ausgesandt* werden (wir nehmen dabei an, dass die gängige Definition der Uhrensynchronisierung [die sog. Radarmethode] dem Leser bekannt ist), oder dass diese im Satellitenpunkt S_k *gleichzeitig ankommen bzw. reflektiert werden* (der VLBI-Fall [siehe 23.]). Da diese zwei *Bedingungen*, infolge der endlichen Geschwindigkeit der Lichtausbreitung, im allgemeinen nicht beide auf einmal erfüllt werden können, müsste man eigentlich den Begriff «*quasigleichzeitige*» anstatt «gleichzeitige» Beobachtungen benutzen.

Dies alles wäre aber nur von formaler Bedeutung, wenn sich die Fixpunktconfiguration und der Satellit relativ zueinander nicht bewegten. Da von zwei Stationen *gleichzeitig* ausgesandte Laserpulse den Satelliten im allgemeinen zu verschiedenen Zeiten erreichen und da zwei *gleichzeitig* vom Satelliten reflektierte Laserpulse die entsprechenden Stationen im allgemeinen zu verschiedenen Zeiten verlassen haben, müssen die in den entsprechenden Zwischenzeiten durch den Satelliten bzw. die Stationen zurückgelegten Strecken in der Reduktion der Beobachtungsdaten entsprechend berücksichtigt werden. Dies auch dann, wenn die die zwei Beobachtungsarten definierenden Bedingungen (siehe oben) zufälligerweise erfüllt sein sollten. Denn die Wellenfront des vom Satelliten reflektierten Laserpulses (d.h. des sog. Echos) käme in den einzelnen Fixpunkten P_i der Teilmenge A (als Folge der erwähnten Relativbewegung) im allgemeinen nicht gleichzeitig an. Aus diesem Grunde müssen auch die VLBI-Beobachtungen (siehe 23.) um die Effekte der *Relativbewegung* (hier identisch mit der «*Rotation der Erde*»; siehe 35.) im allgemeinen reduziert werden. Für die Satelliten gilt dies umso mehr, als es praktisch unmöglich ist, dass die Laserpulse die Referenzpunkte P_i einzelner Laserstationen zur gleichen Zeit in Richtung zum Satelliten verlassen würden und dass deren Echos nach dem Empfang zugleich detektierbar wären (beachte hiezu, dass die am Schluss von 22. festgestellte «günstige» Satellitenhöhe für die Echodetektion ungünstig ist). Viel mehr ist es so, dass die einzelnen Laserstationen nur im Stande sind, die Observablen (gemessene Laufzeiten) zu «sammeln», so wie diese anfallen.

Es existiert also keine Beobachtungsart, deren Observablen ohne Berücksichtigung der *Bewegungen* des Satelliten oder der Erde korrekt ausgewertet werden könnten. Da diese Bewegungen letztlich «dynamischen Ursprungs» sind, müsste auch der Begriff «rein geometrische» durch «*quasigeometrische*» Auswertung ersetzt werden, und dies werden wir sogar nur noch für die Auswertungen der VLBI-Beobachtungen zubilligen.

Nun liegt aber kein objektives Kriterium vor, wann Beobachtungen noch und wann sie nicht mehr als quasigleichzeitig zu gelten haben. Deswegen hat es auch keinen Sinn, an den – in

den Frühzeiten der Satellitengeodäsie oft benützten – Begriffen «quasigleichzeitige Beobachtungen» oder «quasigeometrische Auswertung» festzuhalten. Statt dessen benutzen wir nur die Begriffe «Beobachtungen» und «Auswertung».

26. Da nun keine «Art der Gleichzeitigkeit» der Entfernungsbeobachtungen zu Satelliten gewährleistet ist (siehe 25.), besteht eine Beobachtung nicht nur aus der gemessenen *Laufzeit*, d.h. der Zeit, die der Laserpuls braucht, um vom Referenzpunkt P der Laserstation zum Satelliten und danach als Echo zurück zu P zu gelangen, sondern auch aus der gemessenen *Epoche*, d.h. der Zeit im Augenblick, in dem der Laserpuls den Referenzpunkt P der Laserstation in Richtung zum Satelliten verlassen hat.

Was fängt man aber mit der gemessenen Epoche an? Darüber soll im wesentlichen das nachfolgende Kapitel Auskunft geben.

4. Satellitengeodäsie und das inertielle Bezugssystem

27. Wir halten uns an der eingangs 17. gemachten Vereinbarung und betrachten weiterhin nur die Entfernungsmessungen zu Satelliten, nun jedoch zu beliebig tief oder hoch fliegenden Satelliten, da es ja auf die Erfüllung der Bedingungen 22. a), b), c) nicht mehr ankommt.

28. Die einer solchen Messung entsprechende Beobachtungsgleichung lautet dann, bis auf – von der Relativbewegung (siehe 25.) abhängende – vernachlässigbar kleine Terme, wie folgt (vgl. mit (10)):

$$r_i(t) = |\vec{\rho}(t + \tau_i/2) - \vec{R}_i(t)| \quad (18)$$

Hierbei sind t und τ_i die in 26. definierte Beobachtungsepoche bzw. Laufzeit.

$\vec{\rho}(t + \tau_i/2)$ und $\vec{R}_i(t)$ sind dann die im *erdfesten* kartesischen Koordinatensystem (siehe 10.) – als Spaltenmatrizen der entsprechenden Koordinaten – betrachteten Radiusvektoren eines Satelliten S zum Augenblick $t + \tau_i/2 \cong t + r_i/c$ (c = Lichtgeschwindigkeit) und des Fixpunktes P_i (siehe 2.) zum Augenblick t . $r_i(t)$ ist der theoretische Wert der Observablen zum Augenblick t .

29. Nun hilft uns aber die Einführung der Beobachtungsepoche t (siehe 26.) in die Beobachtungsgleichungen (18) solange nicht weiter, als uns die mathematischen Formen der Funktionen $\vec{\rho}(t)$ und $\vec{R}_i(t)$ nicht bekannt sind. Denn wären sie es, so könnte man die numerischen Werte der diese Funktionen charakterisierenden Parameter (z.B. in einem Polynom sind diese Parameter identisch mit dessen Koeffizienten) aus den Beobachtungsgleichungen (18) und den sechs Systembedingungen (vgl. mit 7.) nach der Methode der kleinsten Quadrate bestimmen, und damit wäre auch die Lösung der globalen geodätischen Aufgabe (siehe 2.) abgeschlossen.

Nun, die mathematischen Formen der Funktionen $\vec{\rho}(t)$ und $\vec{R}_i(t)$ sind uns von vornherein nicht bekannt. Stattdessen wissen wir aber, dass die Bewegungen $\vec{\rho}(t)$ und $\vec{R}_i(t)$ des Satelliten S und der Fixpunkte P_i den drei Newton'schen Bewegungsgesetzen und dem universalen Gravitationsgesetz gehorchen. Für unsere Zwecke reicht es, zunächst nur für den

Satelliten das zweite Bewegungsgesetz in einem quasiinertialen Bezugssystem zu formulieren.

30. Unter einem *quasiinertialen Bezugssystem* verstehen wir dabei ein «frei fallendes» Bezugssystem, das relativ zu Quasaren keine Rotation ausübt.

31. Seien also

O und O' die Nullpunkte eines erdfesten (siehe 10.) und eines quasiinertialen kartesischen Koordinatensystems (um die weiteren Ausführungen nicht unnötig zu komplizieren, wählen wir bereits an dieser Stelle O' identisch mit dem Massenmittelpunkt der Erde),

$\vec{\rho}$ und $\vec{\rho}'$ die Radiusvektoren \vec{OS} und $\vec{O'S}$ des Satelliten S,

$W = V + U$ die im Satellitenpunkt S «beobachtete» Summe des Gravitationspotentials V der Erde und des Potentials U der Gezeitenkraft des Mondes und der Sonne bezüglich des Nullpunktes O' (die Gezeitenkraft eines Körpers K im Punkte S bezüglich O' ist definitionsgemäss gleich der Differenz $\vec{g}(S) - \vec{g}(O')$ der auf eine Einheitsmasse seitens des Körpers K an den Stellen S und O' ausgeübten Gravitationskräfte $\vec{g}(S)$ und $\vec{g}(O')$) und

\vec{F} die Summe aller im Punkte S wirkenden nicht-gravitationellen spezifischen Massenkräfte (z.B. des Luftwiderstandes und des Strahlungsdruckes).

32. Das für den Satelliten aufgestellte zweite Newton'sche Bewegungsgesetz nimmt dann im geozentrischen quasiinertialen Koordinatensystem die folgende Form an:

$$\nabla_{\vec{\rho}}^2 \vec{\rho} = -\nabla W + \vec{F}, \quad (19)$$

wobei ∇ der «Gradient-Operator» und $\nabla_{\vec{\rho}}$ die im quasiinertialen Bezugssystem operierende zeitliche Ableitung ist. Die diese Ableitung definierende Eigenschaft lautet also

$$\nabla_{\vec{\rho}} \hat{I}_k = 0, \quad k = 1, 2, 3, \quad (20)$$

wobei \hat{I}_k die Basisvektoren der orthonormalen Basis des quasiinertialen Koordinatensystems sind.

33. Mit Rücksicht auf (4) und (5) gilt aber für die Operatoren $\nabla_{\vec{\rho}}$, $\partial_{\vec{\rho}}$ und $\vec{\omega} \times$, dass

$$\nabla_{\vec{\rho}} = \partial_{\vec{\rho}} + \vec{\omega} \times, \quad (21)$$

wobei $\vec{\omega}$ die Winkelgeschwindigkeit der Rotation des erdfesten gegenüber dem quasiinertialen Bezugssystem und

\times die binäre Operation der Vektormultiplikation ist.

Aus (21) folgt übrigens, dass

$$\nabla_{\vec{\rho}} \vec{\omega} = \partial_{\vec{\rho}} \vec{\omega}. \quad (22)$$

Nach 30. ist weiter

$$\vec{\rho}' = \vec{\rho} + \vec{\varepsilon}, \quad (23)$$

$$\text{wobei } \vec{\varepsilon} := \vec{OO}' \quad (24)$$

der Radiusvektor des Massenmittelpunktes O' der Erde im erdfesten Koordinatensystem ist. Für diesen gilt, gemäss den Definitionen 12. und 31.:

$$|\vec{\varepsilon}| \ll |\vec{R}| < |\vec{\rho}'|. \quad (25)$$

34. Setzt man nun (21) und (23) in (19) ein und vernachlässigt die kleinen Terme (siehe (26)) $\vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{\varepsilon})$, $2\vec{\omega} \times (\partial_{\vec{\rho}} \vec{\varepsilon})$ und $(\partial_{\vec{\rho}} \vec{\omega}) \times \vec{\varepsilon}$, ergibt sich *die Bewegungsgleichung des Satelliten im erdfesten Koordinatensystem* (siehe 10. und 11.) zu:

$$\partial_{\vec{\rho}}^2 \vec{\rho} + \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{\rho}) + 2\vec{\omega} \times (\partial_{\vec{\rho}} \vec{\rho}) + (\partial_{\vec{\rho}} \vec{\omega}) \times \vec{\rho} = -\nabla W + \vec{F} - \partial_{\vec{\rho}}^2 \vec{\varepsilon}. \quad (26)$$

35. Wir werden von nun an die Winkelgeschwindigkeit $\vec{\omega}$ der Rotation des erdfesten (siehe 11.) gegenüber dem quasiinertialen Bezugssystem kurz «die Winkelgeschwindigkeit der Rotation der Erde» nennen.

36. Sei nun

$$\vec{\omega}_0 = \vec{\omega}_0(t)$$

die (bekannte) Winkelgeschwindigkeit der Rotation eines rotationssymmetrischen Starrkörpermodells der Erde, dessen Rotationsachse (dank den entsprechend gewählten Anfangsbedingungen) keine freie Nutation (Polschwankung) ausübt (Bauersima, 1986a) und

$$\vec{\omega} = \vec{\omega}_0 + \vec{\Omega}. \quad (27)$$

Wählt man die Richtungen $\hat{\omega}$ und $\hat{\omega}_0$ der Rotationsachsen der Erde (siehe 35.) und des Starrkörpermodells so, dass sie im bestimmten Augenblick t_0 zusammenfallen, d.h.

$$\hat{\omega}(t_0) = \hat{\omega}_0(t_0), \quad (28)$$

so gilt dann «für sehr lange Zeit»

$$|\vec{\Omega}| \ll |\vec{\omega}_0|. \quad (29)$$

Die «differentielle Winkelgeschwindigkeit»

$$\vec{\Omega} = \vec{\Omega}(t) \quad (30)$$

kann dann sinnvollerweise wie folgt zerlegt werden:

$$\vec{\Omega} = \kappa \vec{\omega}_0 + \vec{\sigma}, \quad (31)$$

$$\text{mit } \vec{\sigma} \cdot \vec{\omega}_0 = 0 \quad (32)$$

$$\text{und } |\kappa| \ll 1, \quad |\vec{\sigma}| \ll |\vec{\omega}_0|. \quad (33)$$

Wählt man auch den dritten Basisvektor \hat{e}_3 der Basis (\hat{e}_1 , \hat{e}_2 , \hat{e}_3) des erdfesten kartesischen Koordinatensystems so, dass:

$$|\hat{e}_3 \times \hat{\omega}_0| = \sin(\hat{e}_3, \hat{\omega}_0) \ll 1, \quad (34)$$

können wir mit Rücksicht auf (32) mit ausreichender Genauigkeit schreiben:

$$\vec{\sigma} = \sigma_1 \hat{e}_1 + \sigma_2 \hat{e}_2. \quad (35)$$

In (31) ist

$\kappa \vec{\omega}_0$ die sog. «Unregelmässigkeit der Rotation der Erde» (beachte 35.) und

$$\vec{\sigma} = \vec{\Gamma} + \vec{v}, \quad (35_1)$$

$$\vec{\Gamma} \cdot \vec{\omega}_0 = \vec{v} \cdot \vec{\omega}_0 = 0. \quad (35_2)$$

Hierbei ist

$\vec{\Gamma}$ die Polschwankung (betrifft die Rotationsachse der Erde [siehe 35.]) und
 \vec{v} die Summe der Differenzen der der Erde und ihrem Starrkörpermodell entsprechenden *Oppolzer'schen Terme* (=erzwungene Nutationen der Rotationsachse der Erde gegenüber dem erdfesten System; siehe Bauersima, 1986 a) und der *erzwungenen Nutationen im Inertialsystem*.
 Betreffend der letzteren gilt die folgende Behauptung: Ein Fehler in einer Nutationskonstanten (d.h. die Differenz der von vornherein unbekanntes Nutationskonstanten der realen Erde und der entsprechenden [bekanntes] Nutationskonstanten des Starrkörpermodells der Erde) wird automatisch als eine scheinbare Polschwankung mit einer quasi-sterntäglichen Periode gedeutet. Die fehlerhafte Nutationskonstante kann nur anhand einer Spektralanalyse der Kurve $\vec{\sigma} = \vec{\sigma}(t)$ identifiziert werden. Diese Analyse sollte mindestens eine Periode der entsprechenden Nutationschwankung in Bezug auf das Inertialsystem umfassen. Die Amplitude der erwähnten Schwankungen zeigt dann den Betrag des Fehlers dieser Nutationskonstanten.

Mit (31) und (35) lautet noch (27):

$$\vec{\omega} = (1 + \kappa)\vec{\omega}_0 + \sigma_1 \hat{e}_1 + \sigma_2 \hat{e}_2 \quad (36)$$

37. Aus den Entfernungsbeobachtungen zu Satelliten können nur die Komponenten $\kappa\vec{\omega}_0$ und $\vec{\sigma}$ der differentiellen Winkelgeschwindigkeit $\vec{\Omega}$ (siehe (31)), d.h. nur die drei unbekanntes (siehe (36)) Parameter

$$\kappa, \sigma_1, \sigma_2 \quad (36_1)$$

bestimmt werden.

38. Eine Auftrennung der Komponenten $\vec{\Gamma}$ und \vec{v} des Vektors $\vec{\sigma}$ (siehe (35)) ist *nachträglich* nur mittels einer Erdmodell-Interpretation möglich. Diese soll jedoch nicht nur die Resultate der Entfernungsbeobachtungen zu künstlichen Erdsatelliten, sondern auch die Resultate der Laserentfernungsbeobachtungen zum Mond, der VLBI-Beobachtungen und anderer Beobachtungsmethoden (z.B. astrometrischen) einschliessen. Die Entfernungsbeobachtungen zum Mond und die VLBI-Beobachtungen sind zwar, von der Observablen her, nur Spezialfälle der Entfernungsbeobachtungen zu Satelliten (siehe 23.), sind jedoch vom physikalischen Gesichtspunkt zu diesen komplementär: Die Beobachtungen zum Mond wegen dessen zeitlicher Wechselwirkung mit der Erde (Deformationen und die Flutreibung) und die VLBI-Beobachtungen wegen deren Unabhängigkeit vom Gravitationsfeld der Erde und der «Eigenschaft» der Richtungen zu Quasaren, im Inertialsystem zu ruhen.

39. Die Bewegungsgleichung (26) des Satelliten enthält ausser der unbekanntes Funktion

$$\vec{\rho} = \vec{\rho}(t)$$

noch einige *unbekannte Parameter*. Die ersten drei von ihnen haben wir bereits identifiziert. Es sind dies die der Winkelgeschwindigkeit $\vec{\omega}$ der Erde (siehe 35.) – gemäss (36) – äquivalenten Parameter κ, σ_1 und σ_2 .

40. Weitere unbekanntes Parameter der Bewegungsgleichung (26) tauchen in der Darstellung des Potentials (siehe 31.)

$$W = V + U \quad (37)$$

als Funktion des Radiusvektors $\vec{\rho}$ des Satellitenpunktes S auf.

Das in einem Punkt \vec{R} der Erdoberfläche beobachtete Gravitationspotential $V(\vec{R})$ der durch die Gezeitenkraft ∇U deformierten Erde ist nach Love gleich

$$V(\vec{R}) = V_0(\vec{R}) + k \cdot U(\vec{R}), \quad (38)$$

wobei $V_0(\vec{R})$ das Gravitationspotential der ungestörten Erde im Punkt \vec{R} und

k die sogenannte zweite Love-Zahl ist.

Das im Satellitenpunkt $\vec{\rho}$ beobachtete Gravitationspotential $V(\vec{\rho})$ der gezeitlich deformierten Erde ergibt sich somit zu

$$V(\vec{\rho}) = V_0(\vec{\rho}) + k \cdot \frac{R}{\rho} U(R\hat{\rho}), \quad (39)$$

wobei R der mittlere Erdradius, $\rho = |\vec{\rho}|$ und $\hat{\rho} = \vec{\rho}/\rho$ ist.

Hiermit geht also (37) über in

$$W = W(\vec{\rho}) = V_0(\vec{\rho}) + U(\vec{\rho}) + k \cdot \frac{R}{\rho} U(R\hat{\rho}). \quad (40)$$

Das Gravitationspotential $V_0 = V_0(\vec{\rho})$ der ungestörten Erde kann als Linearkombination der der Laplace-Gleichung genügenden sphärischen Harmonischen

$$Y_{1nm} = P_{nm}(\sin \varphi) \cdot \cos m\lambda, Y_{2nm} = P_{nm}(\sin \varphi) \cdot \sin m\lambda \quad (41)$$

dargestellt werden, wobei φ und λ die sphärischen Koordinaten («Breite» und «Länge») und P_{nm} die zugeordneten Legendre-Polynome sind.

Legt man den Koordinatennullpunkt in den Massenmittelpunkt O' der ungestörten Erde und wählt die Richtungen der Koordinatenachsen parallel zu jenen des erdfesten Koordinatensystems, nimmt diese Darstellung die folgende Form an (siehe 31. und (23)):

$$V_0 = \frac{GM}{|\vec{\rho} - \vec{\varepsilon}|} \left\{ 1 + \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{R}{|\vec{\rho} - \vec{\varepsilon}|} \right)^n (C_{nm} \cdot Y_{1nm} + S_{nm} \cdot Y_{2nm}) \right\}, \quad (42)$$

wobei GM das Produkt der universellen Gravitationskonstanten mit der Masse M der Erde, die sog. «Gravitationskonstante der Erde»,

R der mittlere Erdradius und

C_{nm}, S_{nm} dimensionslose Konstanten, die sog. «Potentialkoeffizienten» sind.

Die Tatsache, dass der Nullpunkt des Koordinatensystems im Massenmittelpunkt O' der Erde gewählt wurde, äussert sich in (42) durch das Fehlen der Terme erster Ordnung, d.h. durch

$$C_{10} = C_{11} = S_{11} = 0 \quad (43)$$

(der Term mit S_{10} fällt nicht in Betracht, da $Y_{210} \equiv 0$ [siehe (41)₂]).

Mit Rücksicht auf (40) und (42) können wir nun für das Potential W in symbolischer Form schreiben:

$$W = W(\vec{\rho}; GM, C_{nm}, S_{nm}, \vec{\varepsilon}, k) \quad (44)$$

$$\text{mit } n = 2, 3, \dots, N, \quad m = 0, 1, \dots, n. \quad (44_1)$$

Die eingangs 40. «angekündigten» neuen unbekannt Parameter der Bewegungsgleichung (26) sind also identisch mit

$$GM, C_{nm}, S_{nm}, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, k, \quad (45)$$

wobei $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ die Komponenten des Vektors $\vec{\varepsilon}$ (siehe (24)) im erdfesten Koordinatensystem sind und n, m die Werte (44₁) annehmen.

41. Schliesslich sei noch

$$\vec{F} = \vec{F}(\vec{\rho}, \partial_0 \vec{\rho}; s_1, \dots, s_\alpha, l_1, \dots, l_\beta) \quad (46)$$

das Modell der in der Bewegungsgleichung (26) figurierenden Summe der auf den Satelliten wirkenden, spezifischen dissipativen Kräfte, d.h. des sog. Strahlungsdruckes und Luftwiderstandes. Der erstere ist durch die Parameter s_i und der letztere durch l_i charakterisiert.

Damit haben wir die letzten unbekannt Parameter der Bewegungsgleichung (26) identifiziert, nämlich:

$$s_1, s_2, \dots, s_\alpha, \quad l_1, l_2, \dots, l_\beta. \quad (47)$$

42. Bevor wir endlich mit der Erläuterung der Auswertung unserer zwei *Observablen*, d.h. der in 25. definierten *Epoche* und *Laufzeit*

$$t \text{ und } \tau_i \quad (48)$$

($i = \text{Stationsindex}$) beginnen, führen wir noch eine kleine Umformung der Beobachtungsgleichung (18) durch. Dies mit der folgenden Absicht:

Wir wünschen, dass die das erdfeste Koordinatensystem definierenden Systembedingungen (9) für *solche* Korrekturen $\Delta \vec{R}_i$ der konventionellen Positionen \vec{R}_i^0 (siehe (7)₁) der Fixpunkte P_i (siehe 2.) formuliert werden, die *keine* kurzperiodischen Änderungen der Positionen \vec{R}_i einschliessen. Unter solchen Änderungen verstehen wir die Änderungen der Positionen \vec{R}_i infolge der gezeitlichen Deformationen der Erde.

43. Sei also

$\vec{R}_{i0} - \vec{\varepsilon}$ (siehe 31. und (24)) der geozentrische Radiusvektor des Fixpunktes P_i (siehe 2.) der Oberfläche der *unge störten* Erde (die Bezeichnung \vec{R}_{i0} hat mit jener in (3) nichts zu tun) und

$\vec{R}_i - \vec{\varepsilon}$ der geozentrische Radiusvektor desselben Fixpunktes der durch die Gezeitenkraft ∇U deformierten Erde.

Nach Love ist dann, in guter Näherung:

$$(\vec{R}_i - \vec{\varepsilon}) = (\vec{R}_{i0} - \vec{\varepsilon}) + h \cdot \frac{U(\vec{R}_{i0} - \vec{\varepsilon})}{|\nabla V_0(\vec{R}_{i0} - \vec{\varepsilon})|} \cdot \frac{\vec{R}_{i0} - \vec{\varepsilon}}{|\vec{R}_{i0} - \vec{\varepsilon}|},$$

wobei h die sog. erste Love-Zahl ist.

Da der zweite Term der rechten Seite und auch $|\vec{\varepsilon}|$ (siehe (25)) sehr klein sind ($|\text{zweiter Term}|/R < 10^{-7}$), folgt aus dem letzten Ausdruck mit ausreichender Genauigkeit, dass

$$\vec{R}_i = \vec{R}_{i0} + h \cdot \frac{U(\vec{R}_i^0)}{g} \hat{R}_i^0, \quad (49)$$

wobei \vec{R}_i^0 der Näherungswert von \vec{R}_i bzw. R_i ist und

$$g = |\nabla V_0(\vec{R}_i^0)| \quad (50)$$

$$\hat{R}_i^0 = \vec{R}_i^0 / R_i^0. \quad (51)$$

Man definiere nun die den Systembedingungen (9) unterworfenen Korrekturen $\Delta \vec{R}_i$ durch

$$\vec{R}_{i0} = \vec{R}_i^0 + \Delta \vec{R}_i. \quad (52)$$

Damit (beachte die eingangs 43. gegebene Definition von \vec{R}_{i0}) ist der in 42. ausgesprochene Wunsch in Erfüllung gegangen. Setzt man dies in (49) ein, haben wir schliesslich:

$$\vec{R}_i = \vec{R}_i^0 + h \cdot \frac{U(\vec{R}_i^0)}{g} \hat{R}_i^0 + \Delta \vec{R}_i, \quad (53)$$

oder in symbolischer Form

$$\vec{R}_i = \vec{R}_i(\vec{R}_i^0; h, \Delta \vec{R}_i), \quad (53_1)$$

wobei h die *unbekannte* erste Love-Zahl und $\Delta \vec{R}_i$ die *unbekannte* Korrektur der konventionellen Position \vec{R}_i^0 des Fixpunktes P_i (siehe 2.) auf seine Position \vec{R}_{i0} auf der durch die Gezeiten *nicht* deformierten Erde.

Damit haben wir weitere $(3n + 1)$ unbekannt Parameter unserer Aufgabe (siehe 2.), nämlich

$$h, \Delta X_1, \Delta Y_1, \Delta Z_1, \dots, \Delta X_n, \Delta Y_n, \Delta Z_n \quad (54)$$

identifiziert. Hierbei ist h die erste Love-Zahl, und $\Delta X_i, \Delta Y_i, \Delta Z_i$ sind die Komponenten der n Korrekturvektoren $\Delta \vec{R}_i$, $i = 1, 2, \dots, n$ im erdfesten Koordinatensystem.

44. Die Erläuterung der Lösung unserer Aufgabe (siehe 2.) steht nun kurz vor ihrem Abschluss:

Dazu stehen uns (für jeden Satelliten) $2(A_1 + A_2 + \dots + A_n)$ *Observablen* zur Verfügung, nämlich die *Epochen* und *Laufzeiten* (siehe 25.)

$$t_{ia_i} \text{ und } \tau_{ia_i} \quad (55)$$

der a_i -ten Beobachtung ($a_i = 1, 2, \dots, A_i$) zum gegebenen Satelliten S vom i -ten Fixpunkt P_i ($i = 1, 2, \dots, n$) aus, und $(A_1 + A_2 + \dots + A_n)$ *Beobachtungsgleichungen* für die Epochen t_{ia_i} und die den Laufzeiten τ_{ia_i} entsprechenden *Entfernungen*

$$r_{ia_i} = c/2 \cdot (\tau_{ia_i} + \text{atmosphärische Laufzeitkorrektur}) \quad (56)$$

($c = \text{Lichtgeschwindigkeit im Vakuum}$),

nämlich (siehe 28.)

$$r_{ia_i} = |\vec{\rho}(t_{ia_i} + \tau_{ia_i}/2) - \vec{R}_i(t_0)|, \quad (57)$$

wobei

$$t_0 = (\sum_{i,a_i} t_{ia_i}) / (A_1 + A_2 + \dots + A_n). \quad (58)$$

Setzen wir noch vollständigshalber in (57) die rechte Seite von (53) ein. Wir erhalten dann die *Beobachtungsgleichungen* in der Form

$$r_{ia_i} = |\vec{\rho}(t_{ia_i} + \tau_{ia_i}/2) - \vec{R}_i^0 - h \cdot U(\vec{R}_i^0) \hat{R}_i^0 / g - \Delta \vec{R}_i|. \quad (59)$$

Das System der Beobachtungsgleichungen (59) muss noch durch die

6 Systembedingungen (9)

und die

3 Differentialgleichungen (26) für $\vec{\rho}$

als Bedingungsgleichungen ergänzt werden.

Dabei sind noch in (26) die Grössen $\vec{\omega}$, W und \vec{F} durch die rechten Seiten der Ausdrücke (36), (44) und (46) zu ersetzen. (60)

45. Das System der Beobachtungsgleichungen (59), der Systembedingungen (9) und der drei skalaren Differentialgleichungen (26) wird nach der Methode der kleinsten Quadrate in den unbekannt Parametern (36₁), (45), (47) und (54) *aufgelöst*. Zu diesen Parametern treten verständlicherweise die sog. Anfangswerte

$$x_0, y_0, z_0 \text{ und } v_1, v_2, v_3 \quad (61)$$

als die letzten sechs Skalar-Parameter unserer Aufgabe (siehe 2.) hinzu. Diese stellen die Werte der Koordinaten- und der Geschwindigkeitskomponenten des Satelliten S im Anfangsaugenblick t_0 , also die Komponenten der Vektoren $\vec{\rho}_0 = \vec{\rho}(t_0)$ und $\vec{v}_0 = \partial_0 \vec{\rho}(t_0)$ im erdfesten Koordinatensystem dar.

Das zur Auflösung des erwähnten «algebra-differentiellen» Gleichungssystems führende Parameterbestimmungsverfahren stellt eine *komplexe* numerische Technik dar (Beutler, 1982), die uns zur Einsicht in unsere Problematik insofern keinen Beitrag leistet, als sie durch ein Denkeperiment umgangen werden kann: Ausgehend vom Existenz- und Eindeutigkeitssatz für die Lösung des Gleichungssystems (26), denken wir uns ein fiktives, mit heutigen Mitteln aber durchaus realisierbares, numerisches Verfahren zur Auflösung der drei *Differentialgleichungen* (26) in $\vec{\rho}$ als einer *Funktion der in diesen Gleichungen figurierenden Parameter* (36₁), (45), (47) und (61).

Ist nun

$$\vec{\rho} = \vec{\rho}(t, P) \quad (62)$$

diese Funktion und damit

P die Menge der Parameter (36₁), (45), (47) und (61), so kann dann die rechte Seite von (62) für

$$t := t_{iaj}$$

in die Beobachtungsgleichungen (59) eingesetzt werden und diese dann, zusammen mit den sechs Systembedingungen (9), nach der Methode der kleinsten Quadrate in den unbekannt Parametern

$$\kappa, \sigma_1, \sigma_2, \quad (63_1)$$

$$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \quad (63_2)$$

$$GM, C_{nm}, S_{nm} \quad (n = 2, \dots, N; m = 0, \dots, n), \quad (63_3)$$

$$k, h, \quad (63_4)$$

$$\Delta X_1, \Delta Y_1, \Delta Z_1, \dots, \Delta X_n, \Delta Y_n, \Delta Z_n, \quad (63_5)$$

$$s_1, \dots, s_n, l_1, \dots, l_n, \quad (63_6)$$

$$x_0, y_0, z_0, v_1, v_2, v_3 \quad (63_7)$$

aufgelöst werden.

46. Aus

$$V_0 \cong \frac{GM}{\rho} \left(1 + \frac{1}{\rho} \vec{\varepsilon} \cdot \vec{\rho}\right) \quad (64)$$

(siehe (42)) und aus dem dritten Term der rechten Seite von (40) ist ersichtlich, dass mit sinkender Satellitenflughöhe die Genauigkeit der Bestimmung der Gravitationskonstanten GM der Erde und der Love-Zahl k steigt. Dies gilt – wieder nach (64) und (42) – umso mehr für die Koordinaten $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ des Schwerpunktes O' der Erde und die höheren Potentialkoeffizienten $C_{nm}, S_{nm}, n \geq 2$.

47. Der Ausdruck (26) stellt die Bewegungsgleichung eines Satelliten in einem *mit der Winkelgeschwindigkeit* $\vec{\omega}$ gegenüber dem quasiinertialen Bezugssystem (siehe 35.) *rotierenden Koordinatensystem* dar. Dieses ist identisch mit dem durch die sechs Systembedingungen (9) definierten *erdfesten Koordinatensystem*.

Diese Identität wird durch die Beobachtungsgleichungen (59) gewährleistet. Erst durch diese werden nämlich die sonst unabhängigen Gleichungssysteme (26) und (9) miteinander verknüpft: Die Beobachtungsgleichungen (59) beinhalten sowohl die in (26) auftretenden Satellitenpositionen $\vec{\rho}(t)$ als auch die in den Systembedingungen (9) auftretenden Positionen \vec{R}_i der Beobachtungsstationen P_i .

48. Welche Garantie besteht aber dafür, dass die so bestimmte Winkelgeschwindigkeit $\vec{\omega}$ (siehe (36)) tatsächlich auch jene ist, die man im quasiinertialen und nicht in einem anderen Koordinatensystem beobachten würde? Um den Sinn dieser Frage genauer erfassen und zugleich die Antwort geben zu können, bedenke man das Folgende:

Zwei verschiedene mathematische Modelle der in (26) figurierenden Grössen W und \vec{F} implizieren zwei im allgemeinen verschiedene Lösungen (63) unseres Gleichungssystems (26), (9) und (59). Als ein Teil dieser Lösungen ergeben sich dann im allgemeinen auch zwei verschiedene Winkelgeschwindigkeiten der Rotation des erdfesten Koordinatensystems. Dies auch dann, wenn in beiden Fällen (Modelle von W und \vec{F}) gleiche Beobachtungsdaten benützt werden. Denn die Observable ist, als eine Distanz im dreidimensionalen Euklidischen Raum, invariant gegenüber orthogonalen Koordinatentransformationen und somit auch gegenüber einer kinematisch verstandenen Rotation eines Koordinatensystems. Ein und dasselbe reell existierende (das erdfeste) Koordinatensystem kann aber gegenüber einem und demselben (quasiinertialen) Koordinatensystem nicht mit zwei verschiedenen Winkelgeschwindigkeiten rotieren. Da nun jedes mathematische Modell der Grössen W und \vec{F} prinzipiell begrenzt ist, ist auch die diesem Modell – als Lösung des Gleichungssystems (26), (9), (59) – entsprechende Winkelgeschwindigkeit $\vec{\omega}$ der Rotation des erdfesten Koordinatensystems im allgemeinen nicht identisch mit jener, die man im quasiinertialen Bezugssystem feststellen würde. Kurz gesagt, durch Distanzbeobachtungen zu (*endlich entfernten!*) Satelliten kann kein – für beliebig lange Zeiten – stabiler Anschluss an das quasiinertiale Bezugssystem bewerkstelligt werden.

49. In diesem Zusammenhang werden oft die Begriffe der Kurzzeit- und der Langzeitstabilität benützt. Diese Begriffe sind aber bar jeder Bedeutung, denn ein Mess- und Auswerteverfahren ist gemäss einem Kriterium (hier «Realisierbarkeit eines quasiinertialen Bezugssystems») entweder stabil oder instabil. Erst wenn wir aufgrund fundamentaler heuristischer Überlegungen ein Mess- und Auswerteverfahren ausweisen können, das stabil ist, können wir auch – durch einen Vergleich der Resultate – feststellen, über welche Zeiträume ein (vom Prinzip her) instabiles Verfahren Resultate bietet, die deren Bestimmung *noch* gerecht werden.

50. Ein solch stabiles Verfahren stellen die VLBI-Beobachtungen dar. Dies geht aus den folgenden fundamentalen heuristischen Überlegungen hervor:

Wie in 23. erwähnt, stellen die VLBI-Beobachtungen einen Spezialfall der Entfernungsbeobachtungen zu Satelliten dar. Der Satellit wird durch praktisch unendlich entfernte *Quasare*

$$Q_k, \quad k = 1, 2, \dots, u$$

ersetzt, und an die Stelle der Satelliten-*Bewegungs*-Gleichungen (29) treten *drei kinematische* Bedingungen, nämlich die das sog. *quasarenfeste Koordinatensystem* definierenden Systembedingungen für die wahren Richtungen

$$\hat{q}_k, \quad k = 1, 2, \dots, u$$

zu den Quasaren Q_k . Da dieses Koordinatensystem, dem Mach'schen Prinzip gemäss (Bauersima, 1984, 1986a), quasiinertial ist, ist auch das VLBI-Verfahren in dem oben erwähnten Sinne stabil (siehe 48. und 49.).

51. Ist nun

$$\hat{q}_k := \hat{q}_k^0 + \Delta \hat{q}_k, \quad (65)$$

wobei \hat{q}_k^0 der Näherungswert der Richtung \hat{q}_k ist und

$$\Delta \hat{q}_k \perp \hat{q}_k^0, \quad (66)$$

so lauten dann die drei – das quasiinertiale System definierenden – Systembedingungen wie folgt (vgl. mit (9)₂):

$$\sum_k \hat{q}_k^0 \times \Delta \hat{q}_k = 0. \quad (67)$$

Die VLBI-Beobachtungsgleichungen ergeben sich – bis auf eine atmosphärische Distanzkorrektur – aus der Abbildung 1 zu:

$$\hat{q}_k \cdot [\vec{R}_i(t_{ik}) + c \tau_{ik} \hat{q}_k] = a_k, \quad (68)$$

wobei $\vec{R}_i(t_{ik})$ der aus dem Nullpunkt O des erdfesten Koordinatensystems ausgehende Radiusvektor der i-ten VLBI-Station im Augenblick t_{ik} ,

und $\tau_{ik} = t_{ik} - t_k$, die Ankunftszeit einer bestimmten, vom Quasaren Q_k ausgestrahlten Wellenfront an der i-ten VLBI-Station ist.

52. Sind nun \vec{R}_i und \hat{q}_k bzw. \vec{R}_i' und \hat{q}_k' *zugleich* Bezeichnungen für die entsprechenden Spaltenmatrizen der Komponenten der Vektoren \vec{R}_i und \hat{q}_k im erdfesten bzw. quasiinertialen Koordinatensystem, so ist dann:

$$\vec{R}_i' = Q \vec{R}_i, \quad (70)$$

wobei Q die die Rotation des erdfesten gegenüber dem quasiinertialen Koordinatensystem beschreibende Drehmatrix ist.

53. Mit (70) geht dann (68) über in

$$[Q \vec{R}_i(t_{ik})] \cdot \hat{q}_k' + c \tau_{ik} = a_k, \quad (71)$$

und hieraus folgt mit (53) und (65):

$$\{Q[\vec{R}_i^0(t_{ik}) + h \frac{U(\vec{R}_i^0)}{g} \dot{\vec{R}}_i^0 + \Delta \vec{R}_i]\} \cdot (\hat{q}_k^0 + \Delta \hat{q}_k) + c \tau_{ik} = a_k, \quad (72)$$

oder symbolisch

$$\boxed{f(\vec{R}_i^0, \hat{q}_k^0; \alpha, \beta, \gamma, h, \Delta X_i, \Delta Y_i, \Delta Z_i, \Delta \Phi_k, \Delta \Lambda_k, a_k) + c \tau_{ik} = 0} \quad (73)$$

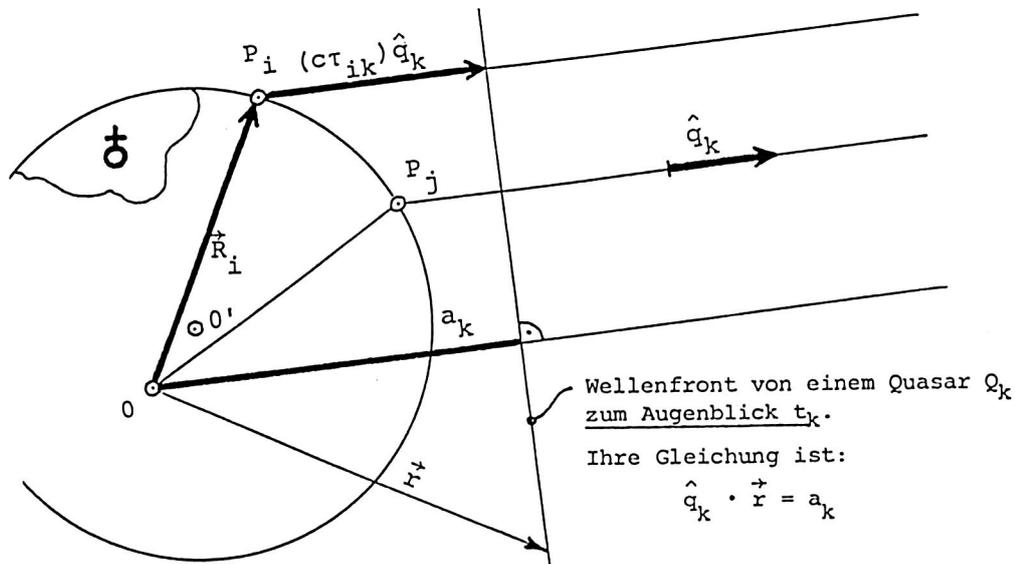


Abbildung 1

54. Hierbei sind

α, β, γ die der Drehmatrix $Q=Q(\alpha, \beta, \gamma)$ (siehe 52.) entsprechenden Euler'schen Winkel als Funktionen der Zeit t_k (betreffend t_k siehe Abb. 1, und betreffend der Korrespondenz $(\alpha, \beta, \gamma) \leftrightarrow (\kappa, \sigma_1, \sigma_2)$ siehe 55. und 56.),

h die erste Love-Zahl,

$\Delta X_i, \Delta Y_i, \Delta Z_i$ die Komponenten der n Korrekturvektoren $\Delta \vec{R}_i$ im erdfesten Koordinatensystem,

$\Delta \Phi_k, \Delta \Lambda_k$ die dem Korrekturvektor $\Delta \hat{q}'_k$ entsprechenden Korrekturen der sphärischen Koordinaten im quasarenfesten Koordinatensystem (beachte (66)!) und

a_k eine Konstante, nämlich die Entfernung der vom Quasaren Q_k ausgestrahlten Wellenfront vom Nullpunkt O des erdfesten Koordinatensystems im Augenblick t_k (siehe Abb. 1).

55. Der in der antisymmetrischen Matrix

$$(dQ/dt)Q^T = \begin{bmatrix} 0 & -\omega'_3 & \omega'_2 \\ \omega'_3 & 0 & -\omega'_1 \\ -\omega'_2 & \omega'_1 & 0 \end{bmatrix}$$

figurierende Vektor

$$\vec{\omega}' \equiv [\omega'_1 \ \omega'_2 \ \omega'_3]^T$$

ist identisch mit der Spaltenmatrix der Komponenten ω'_i , $i = 1, 2, 3$ der Winkelgeschwindigkeit der Erdrotation im quasiinertialen Koordinatensystem (siehe 35. und 52.).

56. Hält man die Bedingung (29) ein, so kann die Differenz $\vec{\omega} - \vec{\omega}_0$

der in 55. definierten Winkelgeschwindigkeit $\vec{\omega}$ und der Winkelgeschwindigkeit $\vec{\omega}_0$ der Rotation des rotationssymmetrischen Starrkörpermodells der Erde, gemäss (36), in die Polbewegungskomponente

$$\sigma_1 \hat{e}_1 + \sigma_2 \hat{e}_2$$

und die Komponente der «Unregelmässigkeit der Rotation der Erde»

$$\kappa \vec{\omega}_0$$

zerlegt werden.

57. Die Beobachtungsgleichungen (73) werden nun zusammen mit den das erdfeste Koordinatensystem definierenden sechs Systembedingungen (9) (beachte die in (52) eingeführte Bedeutung von $\Delta \vec{R}_i$) und den das quasarenfeste Koordinatensystem definierenden drei Systembedingungen

$$\sum_k \hat{q}_k^{0'} \times \Delta \hat{q}'_k = 0 \quad (74)$$

(siehe (67) und 52.) nach der Methode der kleinsten Quadrate in den in 54. aufgeführten unbekanntenen Parametern aufgelöst. Durch die Satelliten-Laser-Beobachtungen und durch VLBI kann genau dann ein *gemeinsames* erdfestes Koordinatensystem festgelegt werden (siehe 6.), wenn die Mengen der SLR- und der VLBI-Fixpunkte mindestens vier

gemeinsame nichtkomplanare Punkte enthalten (siehe 5.a)) oder wenn an mindestens vier solchen Punkten jeder dieser Mengen «Verknüpfungsbeobachtungen» (z.B. GPS-Beobachtungen) durchgeführt werden.

58. Eine Analyse der während der MERIT-Kampagne gewonnenen Beobachtungsdaten hat gezeigt, dass die aus Laserentfernungsmessungen zum geodynamischen Satelliten LAGEOS gewonnenen Werte der Rotationsparameter (siehe (36))

$$\kappa, \sigma_1, \sigma_2,$$

über Zeitperioden bis zu 50 Tagen keine signifikanten Abweichungen gegenüber den durch VLBI-Beobachtungen gewonnenen Werten aufweisen (siehe 49).

Da die Auswertungen der VLBI-Beobachtungen sehr aufwendig und zeitraubend sind und da die Anzahl der VLBI-Stationen sehr begrenzt ist, ist auch die Anzahl der pro Tag gewonnenen VLBI-Einzelbeobachtungen deutlich kleiner als jene der Laserentfernungsbeobachtungen zu Satelliten. Aus diesem Grunde weisen die letzteren Beobachtungen noch immer eine grössere zeitliche Auflösung der Schwankungen der Rotationsparameter $\kappa, \sigma_1, \sigma_2$ als die VLBI-Beobachtungen auf. Die Laserentfernungsbeobachtungen zu Satelliten und die VLBI-Beobachtungen sind also in dem Sinne komplementär, dass die ersteren für eine gute zeitliche Auflösung und die letzteren für die Stabilität der Ermittlung der Rotationsparameter sorgen (siehe 49.).

Nicht umsonst wird der bisherige, aus lauter astrometrischen Stationen bestehende Zeit- und Polschwankungsdienst ab 1988 durch einen lediglich aus VLBI-, SLR- (Satellite Laser Ranging) und LLR- (Lunar Laser Ranging) Stationen bestehenden «*International Earth Rotation Service*» ersetzt (siehe jedoch die Abschnitte 57 bis 59 in Bauersima, 1986a). Durch die drei erwähnten Methoden (VLBI, SLR und LLR) werden drei Parametersätze ermittelt. Da diese nicht identisch sind (vgl. (63₁) bis (63₇) mit 54.), ist es auch physikalisch sinnvoll, alle drei Methoden gleichzeitig zu betreiben. So sind z.B. die Parameter des Gravitationsfeldes und die Position des Massenmittelpunktes der Erde im erdfesten System den VLBI-Beobachtungen allein unzugänglich.

59. Durch die Laserentfernungsbeobachtungen zu den auf dem Mond (während der Apollo-Missionen) aufgestellten Retroreflektoren wird *gegenwärtig* eine säkulare Vergrösserung des mittleren Mondabstandes von der Erde um etwa *3,7 cm pro Jahr* registriert, die nicht durch ein – aus lauter Starrkörpern bestehendes – Modell des Sonnensystems erklärt werden kann. Diese Mondabstand-Vergrösserung ist auf die sog. Flutreibung (Bauersima, 1986a), d.h. auf den, durch Dissipation der elastischen Gezeiten-Deformationsenergie bedingten, langsamen Transfer des Eigendrehimpulses E der Erde in den Bahndrehimpuls B des Mondes zurückzuführen. Auf diese Weise kann also der auf die Flutreibung zurückzuführende Anteil der Unregelmässigkeiten der Rotation der Erde direkt gemessen werden. Ihm entspricht eine Verlängerung der Tageslänge um 2,5 Millisekunden in hundert Jahren oder eine relative Verringerung $d\omega/\omega$ der Winkelgeschwindigkeit der Erdrotation von $7,9 \cdot 10^{-13}$. Diesem Wert entspricht in einem Zeitintervall $(t-t_0)$ eine Abnahme

$\Delta\sigma(t) - \Delta\sigma(t_0)$ der Differenz $\Delta\sigma(t) = \sigma(t) - \sigma'(t)$ der Phasenwinkel σ und σ' der mit der Winkelgeschwindigkeit $\omega = \omega(t)$ rotierenden reellen Erde und einer mit der Winkelgeschwindigkeit $\omega_0 = \omega(t_0)$ gleichmässig rotierenden fiktiven Erde von (Approximation zur Epoche $t_0 = 2000$)

$$\Delta\sigma(t) - \Delta\sigma(t_0) = -\pi \cdot 7,9 \cdot 10^{-13} (t - t_0)^2 / (\text{Sterntag der Epoche } t_0). \quad (75)$$

Dieser Phasendifferenzabnahme entspricht eine Abnahme $\Delta T(t) - \Delta T(t_0)$ der Sternzeitdifferenz $\Delta T = T - T'$, d.h. der Differenz der durch die reelle und die fiktive Erde zum gleichen Augenblick definierten Sternzeiten, von

$$\Delta T(t) - \Delta T(t_0) = -\frac{1}{2} \cdot 7,9 \cdot 10^{-13} (t - t_0)^2 / (\text{Sterntag der Epoche } t_0). \quad (76)$$

Für $(t - t_0) = 100$ Jahre = 36 600 Sterntage der Epoche t_0 erhält man dann

$$\Delta T(t_0 + 100 \text{ Jahre}) - \Delta T(t_0) \cong -46 \text{ sec.} \quad (77)$$

Der numerische Koeffizient der auf die Flutreibung zurückzuführenden Relation (76) kann nur aus den LLR-, nicht aber aus den VLBI-Beobachtungen ermittelt werden. Dies jedoch nicht aus Genauigkeits- sondern aus theoretischen Gründen. Denn durch die VLBI-Beobachtungen wird die Rotation des erdfesten Koordinatensystems kontrolliert. Dieses System ist aber auf die in (9) definierte Weise ausschliesslich mit den Fixpunkten der Erdkruste verknüpft. Weisen nun die Massen der Erde gegenüber dem erdfesten Koordinatensystem einen im allgemeinen zeitlich veränderlichen *relativen Drehimpuls* auf, so äussert sich dieser in entsprechender Änderung der Winkelgeschwindigkeit der Rotation des *erdfesten Koordinatensystems*. Durch VLBI-Beobachtungen kann daher nur die *Summe* der letzterwähnten und der auf die Flutreibung zurückzuführenden Änderung der Winkelgeschwindigkeit des erdfesten Bezugssystems bestimmt werden. Die Laserentfernungsbeobachtungen zum Mond erlauben es hingegen, den Betrag der Winkelgeschwindigkeit der Rotation des *Tisserand'schen Koordinatensystems* zu bestimmen (Bauersima, 1980). Dieses ist identisch mit einem Koordinatensystem, *gegenüber dem der relative Drehimpuls der Erdmassen verschwindet*.

Aus der Differenz der Beträge der Winkelgeschwindigkeiten der Rotationen des erdfesten und des Tisserand'schen Koordinatensystems kann auf den relativen Drehimpuls der Erdmassen gegenüber der Erdkruste geschlossen werden. Dieser relative Drehimpuls hängt wiederum mit der Generierung des magnetischen Feldes der Erde in ihrem flüssigen Kern eng zusammen. Denn ohne eine relative Bewegung der Massen des flüssigen Erdkerns gegenüber dem Erdmantel wäre eine solche Magnetfeldgenerierung im Erdinnern undenkbar.

Wir brechen hier unsere Betrachtungen ab und rekapitulieren:

Bei der Suche nach einem empirisch-theoretischen Verfahren, durch das die globale geodätische Aufgabe (siehe 2.) korrekt gelöst werden könnte, haben wir festgestellt, dass Beobachtungsmethoden (VLBI, SLR, LLR) anzuwenden sind, deren Observablen nur unter Miteinbeziehung geodynamischer Aspekte korrekt ausgewertet werden können. Bei dieser Suche ergab sich der Inhalt der hier «globale Geodynamik» genannten Disziplin von selbst.

5. Die globale Geodynamik

60. Die globale Geodynamik befasst sich mit den folgenden Themen:

- 1) Mit der Bestimmung des Potentials der Gravitationskraft der Erde als einer Funktion des Radiusvektors *und der Zeit* im erdfesten Koordinatensystem (siehe 10. und (9)).
- 2) Mit der Bestimmung der Komponenten der Winkelgeschwindigkeit $\vec{\omega}$ der Rotation der Erde im erdfesten Koordinatensystem (siehe (36)). (Die Komponenten von $\vec{\omega}$ im quasiinertialen System können aus den erwähnten «erdfesten Komponenten» durch Integration der sog. Euler'schen kinematischen Gleichungen gewonnen werden.)
- 3) Mit der Bestimmung der die globalen elastischen Eigenschaften der Erde charakterisierenden Love-Zahlen h und k , im allgemeinen als Funktionen der Zeit.
- 4) Mit der Bestimmung der Koordinaten $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ des Schwerpunktes O' der Erde im erdfesten Koordinatensystem, im allgemeinen als Funktionen der Zeit.
- 5) Mit der Bestimmung der Bewegungen $\Delta \vec{R}_i(t)$ der das erdfeste Koordinatensystem – mittels der sechs Systembedingungen (9) – definierenden Fixpunkte P_i gegenüber diesem erdfesten System.
- 6) Mit der Bestimmung des Betrages der Winkelgeschwindigkeit des Tisserand'schen Koordinatensystems gemäss dem in 59. skizzierten Verfahren.
- 7) Mit der Interpretation (Bauersima, 1986b) der unter 1) bis 6) aufgezählten Resultate in Form eines physikalischen Modells der Erde. Es versteht sich fast von selbst, dass bei dieser Interpretation auch Resultate anderer geodätischer, astrometrischer oder geophysikalischer Beobachtungen berücksichtigt werden müssen.

Literatur

- Bauersima, I., 1980: Allgemeine Diskussion über die «Rotation» eines nichtstarrten Erdmodells. Mitteilungen der Satelliten-Beobachtungsstation Zimmerwald, Nr. 5.
- Bauersima, I., 1984: Coupled Quasar, Satellite and Star Positioning (CQSSP). Mitteilungen der Satelliten-Beobachtungsstation Zimmerwald, Nr. 13.
- Bauersima, I., 1986a: Über die Rotation der Erde (Ein populärer Aufsatz). Mitteilungen der Satelliten-Beobachtungsstation Zimmerwald, Nr. 19, sowie: Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik, 3/87, S. 94–98, 4/87, S. 146–149, 5/87, S. 186–189.
- Bauersima, I., 1986b: Über die mathematischen Methoden der globalen Geodynamik. Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik, 8/86, S. 346–351.
- Beutler, G., 1982: Probleme der Parameterbestimmung in physikalischen Systemen. Mitteilungen der Satelliten-Beobachtungsstation Zimmerwald, Nr. 8.

Die Veranstaltungen zum 125-Jahr-Jubiläum der Schweizerischen Geodätischen Kommission

von Werner Fischer

1. Die Vorbereitungen

An ihrer 132. Sitzung vom 6. April 1984 erteilte die Schweizerische Geodätische Kommission dem Präsidenten die Kompetenz, eine kleine *Planungsgruppe* zur Vorbereitung einer 125-Jahr-Feier im Jahre 1986 zu bestellen. Diese wurde aus Vertretern der wichtigsten geodätischen Institutionen der Schweiz zusammengesetzt:

Prof. Dr. H.-G. Kahle, Präsident der SGK, Vorsitz
 Prof. Dr. F. Kobold, Ehrenpräsident der SGK
 Prof. R. Conzett, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie,
 ETH Zürich
 Prof. A. Miserez, Institut des mensurations, EPF Lausanne
 Dipl. Ing. E. Gubler, Bundesamt für Landestopographie,
 Quästor der SGK
 Dipl. Ing. W. Fischer, Sekretär der SGK, Protokoll.

Sie erarbeitete ein erstes *Grobkonzept* für einen zweitägigen Anlass mit dem Ziel, einen geeigneten Mittelweg zwischen Öffentlichkeitsarbeit und wissenschaftlicher Arbeit zu finden. Dabei wurde auch bald klar, dass der Anlass mit der Feier der Abteilung für Kulturtechnik und Vermessung der ETH Zürich zu ihrem 100jährigen Bestehen zeitlich zusammengelegt werden sollte, da zwei gleichartige Anlässe im gleichen Jahr nicht sinnvoll wären.

1.1 Das Organisationskomitee

Aufgrund dieser ersten Vorarbeiten konnte die Kommission an ihrer nächsten Sitzung vom 19. November 1984 das von der Planungsgruppe vorgeschlagene und unter der Leitung des Kommissionspräsidenten stehende *Organisationskomitee* wählen. Die Leiter der Ressorts und deren Stellvertreter sind in der Tabelle 1 aufgeführt.

Ressort	Leiter	Stellvertreter
Festschrift	Prof. Dr. M. Schürer	Dipl. Ing. W. Fischer
Vorträge	Prof. Dr. H.-G. Kahle	Prof. Dr. F. Kobold
Exkursion	Dr. A. Elmiger	Dipl. Ing. A. Wiget
Ausstellung	Prof. A. Miserez	Dipl. Ing. H. Dupraz
Gesellsch. Anlässe	Prof. F. Chaperon	Dr. R. Guggenbühl
Finanzen	Dir. F. Jeanrichard	Dipl. Ing. E. Gubler
Kontakte (intern.)	Prof. Dr. H.-G. Kahle	Prof. Dr. F. Kobold
Kontakte (national)	Dir. E. Huber	Dir. F. Jeanrichard
Pressechef	Dr. R. Guggenbühl	
Techn. Organisation	Dipl. Ing. W. Fischer	

Tab. 1: Das Organisationskomitee der SGK.

Eine erste Sitzung wurde zu Beginn des Jahres 1985 gemeinsam mit dem Organisationskomitee der Abteilung VIII für Kulturtechnik und Vermessung abgehalten. Im Vordergrund stand die Frage der Koordination. Diese sollte in erster Linie zwischen den entsprechenden Ressortchefs der beiden Organisationskomitees geschehen, in zweiter Linie innerhalb der betreffenden Organisationskomitees. Sodann wurden das Rahmenprogramm und die Termine festgelegt.

Die Einzelheiten der vorgesehenen Veranstaltungen wurden vom Organisationskomitee der SGK in separaten Sitzungen besprochen und bereinigt:

1. Montag, 25. Februar 1985, in Bern (Institut für Exakte Wissenschaften)
2. Donnerstag, 9. Mai 1985, in Bern (Bahnhofbuffet)
3. Mittwoch, 18. September 1985, in Bern (Institut für Exakte Wissenschaften)
4. Mittwoch, 29. Januar 1986, in Zürich (ETH Hauptgebäude)
5. Donnerstag, 19. Juni 1986, in Wabern (Bundesamt für Landestopographie).

Zur Erledigung gemeinsamer Fragen und zur Vorbereitung der getrennt stattfindenden Sitzungen der beiden Organisationskomitees erwiesen sich zudem vier Sitzungen des *Büros* als nützlich und wertvoll:

1. Freitag, 12. April 1985
2. Montag, 16. September 1985
3. Freitag, 10. Januar 1986
4. Mittwoch, 5. März 1986.

Das Büro setzte sich aus den Präsidenten, Sekretären und Finanzchefs der beiden Organisationskomitees zusammen.

1.2 Das Programm

Aus den Bemühungen der beiden Jubilare um einen befriedigenden Konsens ging schliesslich ein *Programm* hervor, das für die zweitägige gemeinsame Veranstaltung die folgenden Aktivitäten vorsah:

Programm vom Freitag, 12. September 1986

Eröffnung
 Vorträge am Vormittag
 Vortragsreihen am Nachmittag
 Festbankett

Programm vom Samstag, 13. September 1986
 Exkursionen

Dieses Programm sollte weitgehend durch die beiden Veranstalter gemeinsam abgewickelt werden, mit Ausnahme der getrennt durchzuführenden Vortragsreihen am Freitag nachmittag und der Exkursionen am Samstag.

Ausserdem war eine gemeinsame *Ausstellung* in der Halle des Hauptgebäudes der ETH Zürich vorgesehen, die auch nach der eigentlichen Festveranstaltung noch öffentlich zugänglich sein sollte.

Die *Öffentlichkeitsarbeit* wurde allgemein als wichtig erachtet, weshalb unter diesem Titel verschiedene Aktivitäten geplant wurden, die im 4. Kapitel zur Darstellung kommen. So bereiteten u. a. beide Jubilare unabhängig voneinander je eine Festschrift vor.

Der vom Bundesamt für Landestopographie bereitwillig und unentgeltlich gedruckte *Faltprospekt* zur gemeinsamen Jubiläumsveranstaltung wurde vom Sekretariat der Abteilung VIII und vom Sekretär der SGK im Kreis der Fachkollegen und Fachorganisationen im In- und Ausland breit gestreut. Von beiden Jubilaren ergingen auch persönliche Einladungen an zahlreiche Exponenten von Verwaltung, Wirtschaft und Wissenschaft zur Teilnahme an den Jubiläumsanlässen.

1.3 Die Gäste der SGK

Die Schweizerische Geodätische Kommission machte es sich zur Ehre, folgende Vertreter der *Internationalen Assoziation für Geodäsie* als Gäste zu ihrem Jubiläum einzuladen:

Prof. P.-V. Angus-Leppan
President of the International Association of Geodesy

Prof. Ivan I. Mueller
First Vice-President of IAG (heute: Präsident der IAG)

M. Michel Louis, Ingénieur géographe
Secrétaire Général de l'Association Internationale de Géodésie

Prof. Dr. Helmut Moritz
Früherer Präsident der Internationalen Assoziation für Geodäsie (heute: Ehrenpräsident der IAG)

Rear Adm. John D. Bossler
President Section I IAG

Dr. R.J. Anderle
President Section II IAG

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Torge
Präsident der Sektion III IAG

Prof. Dr.-Ing. Erik Grafarend
Präsident der Sektion IV IAG

Prof. Dr. Heinz Kautzleben
Präsident der Sektion V IAG

Dr. Charles A. Whitten
Honorary President of IAG

Mr. T. J. Kukkamäki
Honorary President of IAG

Professeur Jean-Jacques Levallois
Ingénieur général géographe, Secrétaire Général Honoraire de l'Association Internationale de Géodésie

Auch freute sie sich besonders, die Präsidenten und Sekretäre der Schwesterorganisationen unserer *Nachbarländer* einzuladen:

emer. Prof. Dr. mult. Karl Rinner
Präsident der Österreichischen Kommission für die Internationale Erdmessung

o. Prof. Dr. Kurt Bretterbauer
Sekretär der Österreichischen Kommission für die Internationale Erdmessung

Prof. Dr.-Ing. Klaus Linkwitz
Präsident der Deutschen Geodätischen Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Prof. Dr.-Ing. Rudolf Sigl
Ständiger Sekretär der Deutschen Geodätischen Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Professeur François Barlier
Président du Comité National Français de Géodésie et Géophysique

M. Jean de Beauregard
Secrétaire Général du Comité National Français de Géodésie et Géophysique

M. Claude Boucher
Ingénieur géographe, Secrétaire du Comité National Français de Géodésie et Géophysique

Presidente della Commissione Nazionale per la Geodesia e Geofisica, c/o Consiglio Nazionale delle Ricerche

Prof. Carlo Morelli
Presidente del Gruppo Nazionale per la Geofisica della Terra Solida (GNGTS)

sowie:

Prof. George Veis
Präsident des Nationalen Komitees Geodäsie/Geophysik von Griechenland

In der Schweiz ergingen Einladungen an die Vertreter der leitenden *wissenschaftlichen Organe*:

Prof. Dr. Urs Hochstrasser
Direktor des Bundesamtes für Bildung und Wissenschaft

Dr. Peter Flubacher
Bundesamt für Bildung und Wissenschaft

Professeur André Aeschlimann
Président central de la SHSN

Professeur Jean-Paul Schaer
Viceprésident de la SHSN

Dr. Beat Sitter
Generalsekretär der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft

Frau Dr. Christina Scherer-von Waldkirch
Stellvertretende Generalsekretärin der SNG

Prof. Dr. Albert Matter
Delegierter der Sektion III der SNG

Professeur Gaston Fischer
Président du Comité national suisse de l'UGGI

Prof. Dr. Hans Peter Laubscher
Präsident des Schweizerischen Landeskomitees ILP

Auch die Präsidenten *nahestehender Kommissionen* und
Gesellschaften der SNG wurden gerne eingeladen:

Prof. Dr. Walter Nabholz
Präsident der Schweizerischen Geologischen Kommission

Prof. Dr. Stephan Müller
Präsident der Schweizerischen Geophysikalischen Kommissi-
on

Prof. Dr. Hans Röthlisberger
Präsident der Schweizerischen Gletscherkommission

Prof. Dr. Daniel Vischer
Präsident der Schweizerischen Hydrologischen Kommission

Prof. Dr. Hans Oeschger
Präsident der Schweizerischen Kommission für Klima- und
Atmosphärenforschung

Prof. Dr. Conrad Max Schindler
Präsident der Schweizerischen Geotechnischen Kommission

Prof. Dr. William Lowrie
Präsident der Schweizerischen Gesellschaft für Geophysik

Als *persönliche Gäste* wurden schliesslich eingeladen:

Frau Yvonne Kobold
Witwe von Prof. Dr. Fritz Kobold, dem früheren Ehrenpräsi-
denten der SGK

Prof. Dr. Ernst Niggli
früherer Zentralpräsident der SNG

sowie die Referenten:

Direktor Francis Jeanrichard
PD Dr. Ivo Bauersima
Dipl. Ing. Erich Gubler
Dr. Nazario Pavoni

Erfreulich viele der eingeladenen Gäste folgten gerne der
Einladung und gaben mit ihrer Teilnahme an den Festveran-
staltungen der SGK die Ehre. Wenn möglich beteiligten sie
sich auch an einer Exkursion am Samstag.

Leider war es unvermeidbar, dass einzelne Gäste wegen des
weiten Weges nach Zürich oder aus anderen Gründen nicht
kommen konnten, so vor allem der Präsident und der 1. Vize-
präsident der Internationalen Assoziation für Geodäsie. Aus
ihren Antworten auf die Einladung, die nachstehend im
Wortlaut wiedergegeben werden, ist ihr Bedauern, aber auch
die Achtung vor den 125 Jahren währenden Leistungen der
SGK zu erkennen.

ASSOCIATION INTERNATIONALE
DE GEODESIE
INTERNATIONAL ASSOCIATION
OF GEODESY



UNION GEODESIQUE ET GEOPHYSIQUE INTERNATIONALE
INTERNATIONAL UNION OF GEODESY AND GEOPHYSICS

Président
P.-V. ANGUS-LEPPAN

Premier Vice-Président
L.-I. MUELLER

Secrétaire Général
M. LOUIS

1449/51 River House Condominium
Ladya Road
Klong San
Bangkok 10604
THAILAND.
1 June 1986.

Prof Dr-Ing H Kahle,
Inst für Geodäsie und Photogrammetrie
ETH-Hönggerberg
CH-8093 Zürich
Switzerland.

Dear Prof Kahle,

125th Anniversary of the Swiss Geodetic Commission.

Thank you for your letter of 14 April and your invitation to participate in
the 125th Anniversary of the Commission. I appreciate the invitation to attend
this important event, but unfortunately I have already committed myself to
another event over this period. You have no doubt noticed that September 1986
is a very busy period for IAG events.

I am very sorry that I shall not be able to attend. I would appreciate it
very much if you could pass on my apologies to the participants in your two-
day meeting, and at the same time give them my good wishes. On behalf of the
IAG, I send sincere congratulations to the Swiss Geodetic Commission on the
occasion of its 125th Anniversary. The high standards of geodesy set by the
Commission are well known internationally. Congratulations on the excellent
achievements of this 125 year period, and best wishes for equal success in the
future. To this I add my own personal congratulations and good wishes.

Yours sincerely

Peter Angus-Leppan

Peter Angus-Leppan
President.

April 18, 1986

Prof. Dr. H.G. Kahle
Swiss Geodetic Commission
ETH-Hönggerberg
CH-8093 Zurich
Switzerland

Dear Hans:

Thank you for your kind invitation of April 14 to attend the SGK's 125th Anniversary. Unfortunately, I will not be able to attend. I hope you will convey to the participants my best wishes and congratulations on this important anniversary.

Sincerely yours,



Ivan I. Mueller
Professor and Chairman

Stellvertretend für weitere Dankschreiben sei hier noch das persönliche Schreiben des Ehren-Generalsekretärs der IAG wiedergegeben:

J.-J. LEVALLOIS
INGÉNIEUR GÉNÉRAL GÉOGRAPHE
À LA RETRAITE

extrêmement sensible à votre très aimable invitation à assister au 125^e anniversaire de la création de la Commission Géodésique Suisse, a le regret de vous faire connaître qu'il ne pourra pas s'y rendre malgré son vif désir. Il a eu le plaisir d'assister aux fêtes du centenaire, mais il ne peut plus guère se déplacer et voyager.

Il profite de l'occasion pour évoquer la mémoire de deux de vos très célèbres collègues, le Prof. BAESCHLIN et le Prof. KOBOLD qu'il a bien connus et appréciés, et vous adressant ses excuses, vous adresse ses meilleurs souhaits de réussite et de succès complet.

2. Das Programm vom Freitag, 12. September 1986

Die für den eigentlichen Festtag, Freitag, 12. September 1986, vorgesehenen Veranstaltungen sind in der Tabelle 2 zusammengestellt.

2.1 Die gemeinsame Ausstellung

Schon Tage vor dem Jubiläum kündeten allenthalben kleine braune *Plakate* die Ausstellung unter dem Motto «Strukturen und Lebensraum» an (Abb. 1). Als Blickfang diente das darauf wiedergegebene Computerbild einer durch die Geoid- und undulationen kräftig deformierten Erde mit der Schweiz im Mittelpunkt, womit die Bedeutung der Geodäsie – und damit auch der Schweizerischen Geodätischen Kommission – für unsere Gesellschaft und ihren Lebensraum augenfällig dokumentiert wurde.



Abb. 1: Das Plakat der Jubiläumsausstellung.

Die *Gestaltung* der Ausstellung lag in den Händen von Prof. *Ernst Spiess*, Vorsteher des Instituts für Kartographie der ETH Zürich, wobei für die Belange der SGK deren Ressortchef Ausstellung, Prof. *Alphonse Miserez*, EPF Lausanne, zuständig war. Angestrebt wurde eine möglichst umfassende Schau über die Fachgebiete der Abteilung und der Geodäsie in Lehre, Forschung und Praxis, was zweifellos auch erreicht worden ist. Der Rahmen der Aussteller wurde entsprechend weit gezogen, angefangen bei der Stabsstelle Pressedienst der

ETH Zürich, über den Schweizerischen Verein für Vermessung und Kulturtechnik, das Bundesamt für Landestopographie, die schweizerische Instrumenten- und Geräteindustrie bis zu den einzelnen Hochschulinstituten.

Das *Ziel* der Ausstellung wird in der Einleitung zum Ausstellungsbeschrieb von Prof. E. Spiess wie folgt umschrieben:

«Die Schweizerische Geodätische Kommission und die Abteilung für Kulturtechnik und Vermessung der Eidg. Tech-

<p>Eröffnung</p> <p>Gemeinsame Ausstellung, Hauptgebäude der ETH Zürich, Haupthalle</p> <p>09.15 Vernissage</p> <p>Vorträge</p> <p>Gemeinsame Veranstaltung am Vormittag, Hauptgebäude der ETH Zürich, Auditorium Maximum</p> <p>10.00 Begrüssung durch den Vorsteher der Abteilung VIII, Prof. Dr. Willy A. Schmid</p> <p>10.20 Ansprache von Dipl. Ing.-Agr. Josef Brücker, Baudirektor des Kantons Uri «Gedanken eines Politikers»</p> <p>10.50 Pause</p> <p>11.10 Grussadressen</p> <p>11.25 Einführung durch den Präsidenten der Schweizerischen Geodätischen Kommission, Prof. Dr. Hans-Gert Kahle</p> <p>11.40 Festvortrag von o. Prof. Dr.-Ing. Rudolf Sigl, Lehrstuhl für Astronomische und Physikalische Geodäsie, T. U. München «Bedeutung geodätischer Raumverfahren für Landesvermessung und Geodynamik»</p> <p>12.30 Mittagspause</p> <p>Vortragsreihe der Abteilung VIII, Hauptgebäude der ETH Zürich, Hörsaal F1</p> <p>14.15 Direktor Dr. Hans M. Horning, Director Land and Water Development Division, Food and Agriculture Organization of the UNO, Rom «Kulturtechnik und Wasserwirtschaft weltweit»</p> <p>15.00 Dipl. Kulturing. ETH Urs Darnuzer, Davos «Strukturverbesserung unserer Gemeinwesen durch Kulturtechnik und Vermessung»</p> <p>15.40 Pause</p>	<p>16.15 o. Prof. Dr.-Ing. Gerd Albers, Lehrstuhl für Städtebau und Regionalplanung, T. U. München «Felder und Grenzen der räumlichen Planung»</p> <p>16.45 PD Dr. sc. techn. Bruno Böhlen, Direktor des Bundesamtes für Umweltschutz, Bern «Die Aufgaben des Ingenieurs zur Sicherung und Gestaltung der Umwelt»</p> <p>17.30 Prof. Dr. Dr. Herbert Grubinger, Professor für Kulturtechnik, ETH Zürich «Zusammenfassung und Ausblick»</p> <p>17.45 Ende</p> <p>Vortragsreihe der Schweizerischen Geodätischen Kommission, Hauptgebäude der ETH Zürich, Hörsaal F7</p> <p>14.15 Prof. Dr. Hans-Gert Kahle, Professor für Geodäsie und Geodynamik, ETH Zürich «Beitrag der Geodäsie zur aktuellen Geodynamik»</p> <p>15.00 Pause</p> <p>15.30 Direktor Francis Jeanrichard, Bundesamt für Landestopographie, Wabern b. Bern «L'état actuel de la recherche sur les mouvements récents de la croûte terrestre en Suisse»</p> <p>16.15 PD Dr. Ivo Bauersima, Leiter der Geodynamik-Gruppe, Astronomisches Institut, Universität Bern «Satellitengeodäsie im Dienste der globalen Geodynamik»</p> <p>17.00 Ende</p> <p>Festbankett</p> <p>Ort: Casino Zürichhorn, Bellerivestrasse 170, Zürich Aperitif: Beginn 19.00 Festbankett: Beginn 19.40; Ende 02.00 Unterhaltung und Tanz Tenue: festlich</p>
---	---

Tab. 2: Das Programm vom Freitag, 12. September 1986.

nischen Hochschule Zürich möchten mit dieser gemeinsamen Ausstellung bei einem weitem Publikum Interesse und Verständnis für ihren Aufgabenbereich im Rahmen unserer Volkswirtschaft wecken und über ihre Tätigkeiten orientieren. Die Berufsgruppe der Kulturingenieure und Vermessungsingenieure, die sich hier darstellt, erbrachte und erbringt für unser Land verschiedene wichtige Dienstleistungen, die oft als selbstverständlich hingenommen werden, auf die man aber nicht verzichten könnte. Ein Jubiläum vereinigt meistens die Komponenten Rückblick, Standortbestimmung und Ausblick. Diese sind auch in unserer Ausstellung enthalten.»

Die an der Ausstellung beteiligten Firmen und Organisationen sind in der Tabelle 3 zusammengestellt, die ebenfalls dem Ausstellungsbeschrieb entnommen ist.

<p>Aecherli AG, Maschinenfabrik, Reiden Aerni-Leuch AG, Lichtpaus- und Verpackungstechnik, Reprographische Betriebe, Liebfeld-Bern Biland AG, Digital-Planimeter und Koordinatographen, Mutschellen Contraves AG, Interaktive, graphische Informationssysteme, Zürich Digital AG, Datenverarbeitungs- und Landinformationssysteme, Zürich Kern & Co. AG, Präzisionsmechanik und Optik, Aarau Kümmerly & Frey AG, Cartomatic Center, Kartographie, Bern Landwirtschaftliches Bau- und Architekturbüro des Schweiz. Bauernverbandes, Winterthur Schenkel Vermessungen AG, Industrievermessungen, Photogrammetrie und Kartographie, Zürich Schweiz. Vereinigung Industrie + Landwirtschaft, Zürich Solexperts AG, Präzisionsinstrumente für Deformationsmessungen, Schwerzenbach Wild Heerbrugg AG, Werke für Optik und Elektronik, Heerbrugg</p> <p>Bundesamt für Landestopographie, Wabern-Bern Schweizerischer Verein für Vermessung und Kulturtechnik Schweizerische Geodätische Kommission Astronomisches Institut der Universität Bern Ecole polytechnique fédérale de Lausanne: – Photogrammétrie Eidgenössische Technische Hochschule Zürich: – Abteilung für Kulturtechnik und Vermessung – Institut für Denkmalpflege – Institut für Geodäsie und Photogrammetrie – Institut für Hydromechanik und Wasserwirtschaft – Institut für Kartographie – Institut für Kulturtechnik – Institut für Orts-, Regional- und Landesplanung</p>

Tab. 3: Die Aussteller an der Jubiläumsausstellung.

Die *Schweizerische Geodätische Kommission* führt selbst keine eigenen Arbeiten aus, sondern initiiert sowie koordiniert solche und unterstützt sie aus den ihr zur Verfügung stehenden Mitteln. Ausführende Organe sind die einzelnen Institute, die es denn auch waren, die an der Ausstellung Zeugnis von ihren Forschungsarbeiten ablegten. Dies kam im Ausstellungsbeschrieb von Prof. E. Spiess deutlich zum Ausdruck, der hier nochmals zitiert sei:

«Einen gewichtigen Anteil an der Ausstellung bestreiten die Institute, die einen engeren Bezug zur Geodäsie und zur Abteilung für Kulturtechnik und Vermessung haben. Sie zeigen Ausschnitte aus ihrer Forschungs- und Lehrtätigkeit und sind bemüht, mit erläuternden Darstellungen die neusten Entwicklungen in ihren Fachbereichen zu signalisieren. In der Geodäsie sind mit der Einführung der globalen Positionierungs-Systeme mit NAVSTAR-Satelliten umwälzende Änderungen in den Vermessungsmethoden bereits abzusehen. Das Astronomische Institut der Universität Bern beschreibt die hochpräzise Laserdistanzmessung zu Satelliten, wie sie von der Sternwarte Zimmerwald aus erfolgt. Die Photogrammetrie befasst sich mit der digitalen Auswertung von grossformatigen Luftbildern, wie sie von Raumstationen aus aufgenommen wurden, und mit Geländeuntersuchungen. Konzepte für Landinformationssysteme, interaktive geodätische Berechnungen, spezielle Gerätekonstruktionen für Sonderaufgaben in der Vermessung und Hinweise zur Ausbildung sowie ein Beitrag des Instituts für Denkmalpflege über archäologische Aufnahmeverfahren runden den vermessungstechnischen Teil ab.»

Neben der darin erwähnten *Laserdistanzmessung zu Satelliten* in Zimmerwald sei auf dem Gebiet der Geodäsie besonders an die ausgestellten Arbeiten der Professur *Geodäsie und Geodynamik* (Prof. Dr. H.-G. Kahle) des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie erinnert. Eine gute Übersicht über die vielfältigen Forschungsprojekte auf dem Gebiet der Geodäsie und Geodynamik vermittelte eine erste Tafel, die in der Abbildung 2 wiedergegeben ist. Vier weitere Tafeln gaben mit ihren Kurzbeschrieben, Diagrammen und Photographien wertvolle Informationen zu einzelnen Teilgebieten. Deren Inhalt sei hier kurz zusammengefasst:

Geodätische Astronomie:

Das Prinzip der Bewegung der Erde im Sonnensystem und der Bestimmung von Länge und Breite eines Standortes wird vorgestellt.

Astronomische Geodäsie:

Zenitkamera-Messsystem (TZK), Auswertesystem, Ivrea-Projekt

Das Prinzip der Zenitkamera wird dargestellt mit einem Blick auf das Auswertesystem, wo die Filme der Zenitkamera computergestützt ausgewertet werden. Die Anwendung der TZK im Ivrea-Projekt (Norditalien, Tessin) zur Störkörperbestimmung wird dargestellt.

Satellitengeodäsie:

Satelliten-Doppler-Messungen im U.S. Navy Navigation Satellite System (NNSS)

Das Messprinzip wird aufgezeigt neben der Präsentation von zwei Projekten in der Schweiz:

SWISSDOC: Dreidimensionale geozentrische kartesische

<p>AUFGABEN UND ZIELGROSSEN</p>	<h1>GEODÄSIE UND GEODYNAMIK</h1>					
	<p>1. Bestimmung der Figur und des äusseren Schwerfeldes der Erde sowie deren zeitliche Änderungen 2. Erstellung der Grundlage für globale und nationale geodätische Netze zur Vermessung der physischen Erdoberfläche 3. Messung von geodynamischen Parametern (Bewegungsraten der Lithosphärenplatten(Plattentektonik), rezente Krustenbewegungen Gezeiten, Polschwankungen und Änderung der Erdrotation)</p>					
<p>INHALT</p>	<p>MATHEMATISCHE GEODÄSIE</p> <ul style="list-style-type: none"> - Koordinaten(referenz)systeme - Flächentheorie und Differentialgeometrie - Figur der Erde (Ellipsoid) - Reduktion von Beobachtungen auf das Ellipsoid - Landesvermessung 	<p>PHYSIKALISCHE GEODÄSIE</p> <ul style="list-style-type: none"> - Schwerfeld der Erde - Potentialtheorie - Gezeiten - Figur der Erde (Geoidbestimmung) - Höhen(referenz)systeme 	<p>ASTRONOMISCHE GEODÄSIE</p> <ul style="list-style-type: none"> - Fixsternbezogene Koordinatensysteme - Astrogeodätische Ortsbestimmung - Azimutbestimmung - Lotabweichungen - Geoidbestimmung - Sternkatalog - Zeitsysteme - Polhöhenchwankung 	<p>SATELLITENGEODÄSIE</p> <ul style="list-style-type: none"> - Satellitenbahnen - Satellitengestützte Orts- und Zeitbestimmung - Geoidbestimmung - Dynamische Positionierung (Navigation) 	<p>GEODYNAMIK</p> <ul style="list-style-type: none"> - Rezente horizontale und vertikale Bewegungen der Erdkruste - Plattentektonik - Polschwankungen - Erdrotationschwankungen 	
<p>Messverfahren -geräte</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Richtungsmessungen - Höhenmessungen - Distanzmessung 	<ul style="list-style-type: none"> - Gravimetrie - Lotabweichungsbestimmung - Inertiales Vermessungssystem 	<ul style="list-style-type: none"> - Zeitmessung - Richtungsmessung - Höhenwinkelmessung - Zenitkamera 	<ul style="list-style-type: none"> - Dynamische Methode - Doppler-Frequenzverschiebungen - Laufzeitmessung - Phasemessung - Phasendifferenzen - Laserdistanzmessungen - Very Long Baseline Interferometry mit Quasaren 	<ul style="list-style-type: none"> - Laserdistanzmessung - Interferometrie (VLBI) (kosmische Geodäsie) - Präzisionsnivellement - Hydrostatisches Nivellement 	
<p>Projekte am IGP P05</p>	<p>INTEGRIERTE GEODÄSIE: Eine Auswertemethode für alle geodätischen Beobachtungstypen</p>					
	<p>IVREA NFP 20</p>					
	<p>SWISSDOC ALGEDOP NAVSTAR/GPS</p>					
	<p>MTLRS2 auf Mt. Generoso</p>					

Abb. 2: Die Tafel «Geodäsie und Geodynamik».

Koordinaten von ausgewählten Triangulationspunkten werden bestimmt, um daraus einen Satz von Transformationsparametern für den Bezug der schweizerischen Landeskoordinaten in ein globales Bezugssystem zu erhalten.

ALGEDOP: Bestimmung von Geoidhöhen durch Vergleich der mit Doppler bestimmten ellipsoidischen Höhen mit den nivellierten Höhen (~ orthometrische Höhen) im Alpengebiet.

Satellitengeodäsie und Geodynamik:

Satellite Laser Ranging (SLR) und Global Positioning System (GPS)

Die Tafel ist eine anschauliche «dreidimensionale» Darstellung der Messprinzipien der beiden Methoden über einer Vogelschaukarte der Schweiz anhand der Messkampagnen Monte Generoso–Jungfrauoch–Zimmerwald (SLR) und Testnetz Turtmann (GPS).

Für geodätisch Interessierte wurden auf einem Büchertisch die neuesten *Publikationen* der SGK und der Satelliten-Beobachtungsstation Zimmerwald zur Besichtigung aufgelegt. Auf dem benachbarten Institutstisch lagen zudem die Mitteilungen und Berichte des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie auf, während das Verzeichnis der Veröffentlichungen des IGP, das auch die Publikationen der SGK umfasst, zur freien Bedienung bereitlag.

2.2 Die gemeinsame Veranstaltung vom Vormittag

Die auf 09.15 Uhr angesetzte *Vernissage* der Ausstellung bildete somit einen sinnvollen und geeigneten Auftakt der ganzen Jubiläumsveranstaltung. Ein zahlreiches Publikum aus nah und fern hatte sich bereits zu dieser frühen Stunde in der Halle des Hauptgebäudes eingefunden, wo es sich bei Kaffee und Gipfeli für die bevorstehenden Ereignisse rüsten konnte. In verdankenswerter Weise hatte es Prof. E. Spiess übernommen, den Besuchern einen Überblick über Inhalt und Aufbau der vielseitigen Ausstellung zu geben.

Es bedurfte einiger Überredungskünste, bis sich die Besucher von den interessanten Tafeln und Ausstellungsobjekten trennen konnten, um sich zum eigentlichen *Festakt* ins Auditorium Maximum zu begeben. Um 10.00 Uhr konnte dann der Vorsteher der Abteilung VIII, Prof. Dr. Willy A. Schmid, die Festversammlung offiziell begrüssen, um anschliessend dem Baudirektor des Kantons Uri, Dipl. Ing.-Agr. Josef Brücker, das Wort zu seinen «Gedanken eines Politikers» zu erteilen.

Nach der Pause war einigen geladenen Gästen Gelegenheit gegeben, ihre *Grussadressen* vorzutragen. Zuerst waren die Gäste der Abteilung VIII an der Reihe, gefolgt von einigen Gästen der SGK. Zum 125jährigen Bestehen der SGK sprachen:

Prof. Dr. André Aeschlimann, Neuchâtel, Zentralpräsident der Schweiz. Naturforschenden Gesellschaft,

Prof. Dr.-Ing. Klaus Linkwitz, Präsident der Deutschen Geodätischen Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften,

Prof. Dr. Helmut Moritz, der frühere Präsident der Internationalen Assoziation für Geodäsie,

Prof. Dr. mult. Karl Rinner, Graz, in seiner Eigenschaft als Präsident der Österreichischen Kommission für die Internationale Erdmessung,

Prof. Dr. Heinz Kautzleben, Potsdam, als Präsident der Sektion V der Internationalen Assoziation für Geodäsie und zugleich als Direktor des Zentralinstituts für Physik der Erde in Potsdam.

Prof. Kautzleben hatte sich die Mühe genommen, im Archiv in Potsdam nach Gründungsakten der Mitteleuropäischen Gradmessung zu forschen, und fand darunter neun Briefe von Prof. Dr. Rudolf Wolf, dem damaligen Direktor der Sternwarte in Zürich, an General Baeyer aus den Jahren 1861 bis 1864, die er sorgfältig photokopieren liess. Er freute sich, diese wertvollen Kopien in einer schönen Mappe mit dem Bildnis von General Baeyer dem Präsidenten der Schweiz. Geodätischen Kommission, einer der ersten Mitgliedkommissionen, als Präsent überreichen zu dürfen. Diese Dokumente werden im Archiv der SGK aufbewahrt werden.

Als weiteres Präsent durfte der Präsident eine in einer schönen roten Mappe eingefasste Glückwunsch-Urkunde der Polnischen Akademie in Krakau, zusammen mit einer prächtigen Kristallvase entgegennehmen.

Die knappe zur Verfügung stehende Zeit erlaubte es nicht, noch mehr Redner zu Wort kommen zu lassen. Weitere Glückwunschschriften und Telegramme wurden deshalb an einer Tafel vor dem Auditorium Maximum angeschlagen.

Nach der Einführung durch den Präsidenten der Schweizerischen Geodätischen Kommission, Prof. Dr. Hans-Gert Kahle, erhielt schliesslich Prof. Dr.-Ing. Rudolf Sigl, München, das Wort zu seinem *Festvortrag* über das Thema «Bedeutung geodätischer Raumverfahren für Landesvermessung und Geodynamik». Die SGK ist dankbar und glücklich, dass sich Prof. Sigl trotz seiner grossen Arbeitslast bereit fand, seinen Vortrag für die Publikation in diesem Band redaktionell zu überarbeiten.

2.3 Die Vortragsreihen vom Nachmittag

Nach dem gemeinsamen Mittagessen in der Mensa der ETH versammelten sich die «Anhänger» der Abteilung für Kulturtechnik und Vermessung und der Schweiz. Geodätischen Kommission in zwei verschiedenen Auditorien zu den Nachmittagsveranstaltungen.

Die drei *geodätischen Vorträge* wurden nach dem ausdrücklichen Willen der Kommission von Mitgliedern der SGK bestritten. Diese drei Vorträge sind ebenfalls in diesem Band wiedergegeben, und den Referenten sei auch an dieser Stelle dafür gedankt.

2.4 Das Festbankett

Die minutiöse Vorbereitung des Festbanketts im Casino Zürichhorn – bis zur einfühlsamen Erstellung der Tischordnung für die Ehrengäste – ist der grossen Erfahrung und dem rastlosen Einsatz von Prof. Dr. h. c. *Ernst Trüeb* und vor allen Dingen seiner *Gattin* zu verdanken. Die Gästeschar stammte wohl zum grösseren Teil aus den Reihen der Abteilung VIII,

doch durften sich auch manche Vertreter der Geodäsie samt ihren Gattinnen dazu zählen, die ihrerseits von Prof. *Francis Chaperon* betreut wurden.

Einen Eindruck von dem in allen Teilen gelungenen Festabend vermag wohl das nachstehend wiedergegebene leicht nostalgische Stimmungsbild von Dipl. Ing. und lic. iur. *Georges Horner*, Sekretär der Abteilung für Kulturtechnik und Vermessung, zu vermitteln:

Der Abend liess, begünstigt durch eine angenehme Brise vom See, für die allmählich eintreffenden, festlich gekleideten Gäste, viel Frohes erwarten.

Wiewohl auch die Jünger der Abteilung VIII, aus der Ferne gesehen, nicht zu den geselligsten Naturen gezählt werden – an diesem Abend lag «Atmosphäre» in der Luft, eingestimmt durch ein unverkennbar geometrisches Bild aus vergangenen Zeiten und vom verwehten Klang einer Drehorgelmusik.

Wer würde die Tafelfreuden mit der gepflegten Bedienung nicht geniessen; dazu aber wurde auch viel Eigenes beigetragen. Die «Monkey Come Down Jazz Band» verspielte ihre Rhythmen nicht an Anfänger. Es gab viele herzliche Begegnungen, gekonnte Rede war zu hören, und sogar auf der Bühne wurde viel Kerniges geboten.

Der Kultur- und der Vermessungsingenieur – an der Wurzel gepackt – zeigte sich als Mann, der mit Frau und Musik sehr wohl ein feines Fest gestalten und das unpersönliche Nebeneinander in ein persönliches Miteinander verwandeln kann. Der Abend erinnert uns an das Bekenntnis eines würdigen Vertreters unseres Berufes: «Könnte ich wieder von vorne anfangen, ich würde wieder an der Abteilung VIII studieren!»

3. Die Exkursionen vom Samstag, 13. September 1986

Die Abteilung VIII führte eine ebenso reichbefrachtete wie gutbesuchte Exkursion nach Graubünden (Surselva, Piz Mundaun, Bündner Herrschaft) durch.

Die Schweizerische Geodätische Kommission war demgegenüber sicher gut beraten, ihren Gästen und Interessenten zwei verschiedenartige Exkursionen zur Wahl anzubieten. Die mehr touristisch orientierte Exkursion auf die Rigi hatte auch einige fachliche Komponenten (Demonstration moderner Vermessungsmethoden und -geräte, Landesvermessung, Geologie) im Programm, während die mehr auf das Fachliche ausgerichtete Exkursion nach Zimmerwald ebenfalls einen touristischen Hintergrund (Altstadt von Bern) aufwies.

3.2 Die Rigi-Exkursion

Es war das unbestrittene Verdienst des Ressortchefs Exkursion, Herr Dr. *Alois Elmiger*, als gebürtiger Luzerner einen nahezu «historischen» Ausflug auf den weltberühmten Rigi-berg vorzuschlagen. Dieser Vorschlag fand so grossen Anklang, dass Herr Dr. Elmiger auch sogleich mit der Vorbereitung und der Leitung dieser «Schulreise» betraut wurde. Das von ihm aufgestellte Reiseprogramm sah wie folgt aus:

- 07.58 Abfahrt Zürich HB mit der Bahn nach Luzern
- 09.00 Abfahrt Luzern mit Dampfschiff nach Vitznau und mit Zahnradbahn nach Rigi-Kulm
Gipfelbesteigung (Spaziergang von 10 Minuten)
Aussicht und Gipfeltrunk
Ausführungen zu Landesvermessung und Geologie
- 12.30 Mittagessen im Hotel Rigi-Kulm
- 14.00 Fachdemonstrationen und kleiner Spaziergang
- 17.00 Abfahrt Rigi-Kulm nach Arth-Goldau und Zürich
- 18.50 Ankunft Zürich HB

Über die Durchführung kann er am besten gleich selbst berichten:

Am Samstagmorgen brauchte es – nach dem Bankett vom Vorabend im Casino Zürichhorn und einer recht kurzen Nacht im Hotelbett – für die meisten noch etwas müden, aber willigen Rigidfahrer allerdings einen starken Willen und einige Entschlossenheit, sich rechtzeitig am Hauptbahnhof Zürich einzufinden. Einigen sah man es fast an, dass man zu so früher Stunde im Hotel noch nicht mit einem Frühstück hatte rechnen können. Nach einer knapp einstündigen Bahnfahrt traf man dann in Luzern vor einem alten Vierwaldstättersee-Raddampfer seine Kollegen, sowie alte und neue Bekannte aus der Innerschweiz. Die Fahrt über den See «vo Lozärn gäge Wäggis zue» und bis nach Vitznau ist immer entspannend und beruhigend, besonders auf einem alten Dampfschiff, auch wenn das Wetter an diesem Tage nicht so freundlich war, wie man es sich gewünscht hätte. Einige sahen sich einmal von nahem an, wie eine über achtzigjährige Dampfmaschine (immer noch bestens) funktioniert, andere holten im Schiffsalon das verpasste Frühstück nach, und die ganz Unentwegten liessen auf dem luftigen Oberdeck die klassische Schulreise-Landschaft an ihren Augen vorbeiziehen.

Vitznau. Zahnradbahn nach Rigi-Kulm. Alphornklänge begrüßten die Rigidfahrer vor dem Hotel Rigi-Kulm. Das Alphorn blies – Gottfried Keller? Wohl kaum – bei näherem Hinsehen entpuppte sich die würdige Gestalt als Werner Scheibel, eine der tragenden Stützen des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie. Nach einem kleinen Spaziergang zum Gipfel genehmigte man sich ein Gläschen Weisswein und etwas Hobelkäse, während Werner Scheibel wiederum das Alphorn erklingen liess.

Die Aussicht vom Gipfel – an schönen Tagen einmalig – war am Tage selbst (an einem 13. wohl kaum anders möglich?) zwar nicht ohne Reiz, aber leider durch Wolken und Nebel etwas behindert. Immerhin konnte die Alpenkette vom Säntis über den Titlis bis zur Jungfrau mit etwas gutem Willen identifiziert werden, und aus der Tiefe grüsste durch Nebelfetzen zeitweise ein grünblauer Zugersee.

Versammelt um die Signalpyramide des Punktes 1. Ordnung Rigi hörten wir anschliessend die Ausführungen von Herrn Erich Gubler, Abteilungsleiter beim Bundesamt für Landestopographie und Quästor der Schweiz. Geodätischen Kommission, der einen anschaulichen Überblick über die Grundlagen der schweizerischen Landesvermessung und über Methoden und Arbeiten der letzten hundert Jahre gab. Dann erklärte Dr. Nazario Pavoni (vom Institut für Geophysik der ETHZ) anhand der rundherum liegenden Steine die Geschichte der in der Runde sichtbaren geologischen Formationen und die Entstehung und Bildung der Schweizer Alpen.

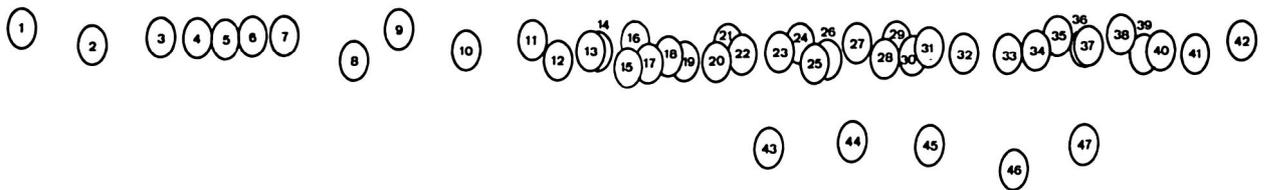


Abb. 3: Gipfeltrunk beim Triangulationspunkt 1. Ordnung Rigi.

Auf dem Bild sind erkennbar (soweit dem Exkursionsleiter bekannt):

Links der Pyramide:

1 André Flotron, 2 Richard Köchle, 3 Martin Vögeli, 4 Erich Gubler, 5 Adrian Ryf, 6 Bruno Wirth, 7 Dir. Francis Jeanrichard

Unter der Pyramide:

8 Werner Schneibel (mit Alphorn), 9 Gottfried Zürrer, 10 Heinz Haiber, 11 Rolf Kägi, 12 Prof. H.-P. Friedrich

Rechts der Pyramide:

13 Frau Prof. Imhof, 15 Frau Prof. Rinner, 16 Prof. Alphonse Miserez, 17 Frau Prof. Miserez, 18 Prof. Karl Rinner (Graz), 20 E. Stössel, 21 Franz Haas, 23 Frau Jeanrichard, 24 Prof. Rudolf

Conzett, 26 Frau Prof. Conzett, 27 Dr. Nazario Pavoni, 28 Martin Wirthner, 29 G. Michlig, 32 Dr. Hermann Fischer, 33 K. Zippelius (München), 34 Beat Bürki, 35 Alain Geiger, 37 Werner Meier, 38 Adrian Wiget, 40 René Haag, 42 Dr. Alois Elmiger

Vordere Reihe:

43 Prof. J.E. Alberda (Delft), 44 Gebhard Eugster, 46 Hans-Viktor von Sury

Nicht auf dem Bild:

Herr und Frau Prof. Rudolf Sigl (München) sind wegen Erkältung im Hotel Rigi-Kulm geblieben, Herr und Frau Prof. Hans-Gert Kahle sind erst später eingetroffen, Dr. Heinz Aeschlimann hat fotografiert.

Schliesslich versammelte Dr. Heinz Aeschlimann (Kommissionsmitglied und international bekannter Mitarbeiter bei Kern, Aarau) die Teilnehmer zu einer offiziellen Jubiläum-photo rund um die Signalpyramide (Abb. 3). Unter den etwa 50 Teilnehmern seien insbesondere folgende ausländische Gäste erwähnt, die den Anlass durch ihre Teilnahme beehrten: Herr und Frau Prof. Rudolf Sigl, München, Herr und Frau Prof. Karl Rinner, Graz, und Prof. J.E. Alberda von Delft, Niederlande. Unter den Schweizern fehlte natürlich nicht der Direktor des Bundesamtes für Landestopographie, Herr Francis Jeanrichard, Vizepräsident der SGK, in Begleitung seiner Gattin.

In der Zwischenzeit fühlte man sich etwas abgekühlt und war gerne bereit für ein wärmendes Mittagessen im Hotel Rigi-Kulm. Menu: Berner Platte, wie es sich für eine schweizerische Kommission, die vor 125 Jahren in der Bundeshauptstadt Bern gegründet worden ist, geziemt. Inzwischen war auch der amtierende Präsident dieser Kommission, Prof. Hans-Gert Kahle, munter und aktiv wie immer und ohne sichtbare Spuren vom Vorabend-Festbankett, in Begleitung

seiner Gattin, eingetroffen. Ansprachen waren im vollen Saal mit verschiedenen Reisegruppen allerdings nicht möglich. Nach der Berner Platte und schliesslich nach gebrannter Crème und Kaffee hatte sich das Wetter etwas freundlicher entwickelt, und man versammelte sich auf der Hotelterrasse, wo Dr. Heinz Aeschlimann mit originellen Worten auf die Geschichte und Landschaft des Rigi-Berges einging.

Der fachliche Teil der Tagung wurde durch einen Kurzvortrag von Herrn Erich Gubler (L+T) eröffnet. Im Sitzungszimmer des Hotels Rigi-Kulm zeigte er einen Video-Film «Historisches über die schweizerische Landesvermessung». Sodann hatte man Gelegenheit, einige heutige und ältere Methoden der Landesvermessung praktisch kennenzulernen. Auf einem Rundweg um den Gipfel der Rigi wurden folgende Methoden und Geräte demonstriert: Elektronische Distanzmessung (Elektrooptische Geräte von Wild und Kern, Mikrowellen-Distanzmesser SIAL), ältere und neuere Triangulationstheodolite von Kern und Wild, astronomische Beobachtungsinstrumente (Zenitkamera IGP, Kern DKM3A), Schweremessung mit Gravimeter sowie geodätische Satelliten-Empfänger

ger: Magnavox 1502 für die Transit-Doppler-Methode und WM101 von Wild-Magnavox für den Empfang der GPS (Global Positioning System)-Satelliten.

Schliesslich blieb noch etwas Zeit für kollegiale Diskussionen beim Kaffee, für eine weitere Betrachtung des ständig wechselnden Anblicks der Schweizer Alpenkette oder für einen kleinen Spaziergang hinunter zum alten Wallfahrtsort Rigi-Klösterli, wo natürlich ein Berggasthaus nicht fehlt.

Um 17 Uhr fuhr man dann, wie vorgesehen, mit der Zahnradbahn nach Arth-Goldau zurück, wo sich die Wege trennten: die Innerschweizer (auch aus dem Wallis) zurück nach Luzern, der Hauptharst zurück nach Zürich.

3.2 Die Exkursion nach Bern/Zimmerwald

Das Programm für die mehr wissenschaftlich orientierte Exkursion in die Satellitenbeobachtungsstation Zimmerwald wurde in enger Rücksprache mit Herrn Dr. *Werner Gurtner*, Mitarbeiter des Astronomischen Instituts der Universität Bern und Mitglied der Schweiz. Geodätischen Kommission, aufgestellt. Es sah am Nachmittag noch einen Besuch der Altstadt von Bern vor und gestaltete sich damit wie folgt:

- 08.00 Abfahrt Zürich HB mit der Bahn nach Bern
- 09.25 Abfahrt Bern mit Postauto nach Zimmerwald
Führung durch die Satellitenbeobachtungsstation
- 11.45 Mittagessen im Restaurant Löwen, Zimmerwald
- 13.20 Abfahrt Zimmerwald mit dem Postauto nach Bern
Führung durch die Altstadt von Bern
Einkaufsbummel (nach Wunsch)
- 16.41 Abfahrt Bern HB (evtl. 17.41, nach Absprache)
- 17.54 Ankunft Zürich HB (evtl. 18.54)

Gegen 20 Teilnehmer der Exkursion fanden am Samstag vormittag den Weg – mit Postauto oder Privatauto – nach Zimmerwald, um sich die Einrichtungen der Satellitenbeobachtungsstation der Universität Bern vorführen zu lassen. Die Präsentation besorgte Dr. *Werner Gurtner*, der nachfolgend einen kurzen Bericht über den Ablauf dieses Besuches gibt:

In Zimmerwald werden seit den sechziger Jahren Beobachtungen von geodätischen Satelliten durchgeführt, zuerst photographisch, später mit Hilfe von Lasern. Seit 1984 werden hier mit einem modernen Lasersystem Distanzen zu den mit Retroreflektoren ausgerüsteten Satelliten mit einer Genauigkeit von wenigen Zentimetern gemessen. Diese Daten dienen – in Verbindung mit entsprechenden Beobachtungen anderer Stationen – dazu, die Bewegung der Erde als Ganzes sowie Bewegungsvorgänge an der Erdoberfläche (Plattentektonik!) zu bestimmen.

Da in Zimmerwald nur nachts beobachtet werden kann, war es den Teilnehmern der Exkursion natürlich nicht möglich, eine Beobachtung «live» mitzerleben. Sie erhielten jedoch trotzdem einen guten Einblick in einen typischen Messablauf, da sie sich Videoaufzeichnungen eines Satellitendurchganges, einen simulierten Messablauf sowie graphische Darstellungen kürzlich durchgeführter Messungen anschauen konnten.

Beim und nach dem gemeinsamen Mittagessen im Restaurant Löwen in Zimmerwald wurde die Gelegenheit benützt, über das Gesehene und Gehörte zu diskutieren. Da sich die Rückfahrt nach Bern wegen Problemen mit den Taxis verzögerte, hatte man ausgiebig Zeit dazu...

4. Die Öffentlichkeitsarbeit

Ein Jubiläum bietet unter anderem auch eine willkommene Gelegenheit, mit den erbrachten Leistungen und den besonderen Anliegen an eine breitere Öffentlichkeit zu treten. Der naheliegendste Weg dazu besteht in der Form von Publikationen. Als solche wurden von der SGK einerseits eine Festschrift und andererseits Zeitungsartikel vorgesehen. Aber auch in Radio und Fernsehen sollte auf die Aufgaben der Geodäsie und die geodätische Forschung hingewiesen werden.

Für die Presse war zudem eine Pressekonferenz am Freitag sowie die Teilnahme an der Exkursion nach Zimmerwald vorgesehen.

Die SGK schätzte sich ausserordentlich glücklich, dass der Pressechef der ETH Zürich, Herr Dr. *Rolf Guggenbühl*, bereit war, ihr mit Rat und Tat bei der Vorbereitung und der Durchführung der Öffentlichkeitsarbeit beizustehen. Sie ist ihm für seinen uneigennütigen Einsatz sehr zu Dank verpflichtet.

4.1 Die Festschrift

Auf die Herausgabe einer «Festschrift» im üblichen Sinn wurde von Anfang an verzichtet, da solche Sonderpublikationen meist allesamt das gleiche Schicksal erleiden, irgendwo in einem Regal zu verstauben. Stattdessen wurde die Möglichkeit in Betracht gezogen, in einem Sonderheft der Zeitschrift «Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik» unter dem Titel «125 Jahre Schweizerische Geodätische Kommission» einige Kommissionsmitglieder mit Fachbeiträgen aus ihrem Arbeitsgebiet zu Wort kommen zu lassen. Die Nummer 8/86 vom August 1986 eignete sich vorzüglich dafür; sie kann bei der Diagonal Verlags AG, Täferstrasse 2, CH-5405 Baden-Dättwil, Telefon 056 / 83 45 50, bezogen werden.

Prof. Dr. *Max Schürer* hatte es in verdankenswerter Weise übernommen, als Chefredaktor für dieses Sonderheft zu wirken und die Fachaufsätze anzufordern und zu redigieren. Der Inhalt des interessanten und vielseitigen Hefts sei hier der Vollständigkeit halber aufgeführt:

H.-G. Kahle: Geleitwort/Préface

M. Schürer: Die geodätischen Arbeiten in der Schweiz während der letzten 25 Jahre

A. Geiger, H.-G. Kahle: Gravimetrisches Geoid der Schweiz

St. Müller: Räumlich-zeitliche Unregelmässigkeiten im Schwere- und Magnetfeld der Erde

F. Jeanrichard: L'état actuel de la recherche sur les mouvements de la croûte terrestre en Suisse

W. Gurtner, G. Beutler: Die Rolle der Satellitengeodäsie in der Vermessung

D. Meier, H. Aeschlimann: Elektronische Distanzmessung – Rückblick und Ausblick

I. Bauersima: Über die mathematischen Methoden der globalen Geodynamik

F.K. Brunner, H.R. Schwendener: Das Engagement von Wild Heerbrugg in der Geodäsie.

Das Umschlagbild des Hefts zeigt das Lasertelemeter der Satelliten-Beobachtungsstation Zimmerwald.

Ergänzend sei erwähnt, dass das Sonderheft «100 Jahre Abteilung Kulturtechnik und Vermessung an der ETH Zürich» als Nummer 9/86 der gleichen Zeitschrift unmittelbar auf das Jubiläum hin erschien.

4.2 Zeitungsartikel

Bei der Bedienung der Presse mit Material für Zeitungsartikel erwies sich der Einsatz des Pressedienstes der ETH Zürich als von unschätzbarem Wert. Bereits Ende Juli 1986 wurde von diesem eine Presse-Information auf den üblichen «Kanälen» verbreitet. Sie trug den Titel «Felsmasse im Untergrund stört unser Schwerfeld». Aus der Arbeit der ETH Zürich. Von Pierre-André Magnin.

Im Laufe des Monats August konnten dann die Leser schweizerischer Gazetten lesen, was es damit für eine Bewandnis hat:

2. Die Südschweiz: Ein Gegenstand wiegt in Locarno schwerer als in Genf. ETHZ erstellt Schwerkraft-Karte der Schweiz.
5. 24 heures: Au Tessin, le kilo pèse plus lourd. Un grumeau dans la croûte terrestre.
6. Basler Zeitung: Warum ein helvetischer Ozean Buckel und Mulden hätte.
8. Die Ostschweiz: Ein Blick in die «Unterwelt». ETH-Wissenschaftler vermessen das schweizerische Schwerfeld.
14. Neue Zürcher Nachrichten: Massiver Felsbrocken verzerrt unser Schwerfeld.
21. Die Weltwoche: In Genf wiegt alles etwas leichter als im Südtessin. Eine gewaltige Felsmasse im helvetischen Untergrund führt zu beträchtlichen Ungleichheiten im Schwerfeld.
27. Journal de Genève: Le gigantesque «caillou» qui perturbe la Suisse.
27. Neue Zürcher Zeitung: Warum ein Kilogramm in Locarno schwerer ist als in Genf. Felsmasse im Untergrund stört unser Schwerfeld.

Diese Liste liesse sich noch beliebig erweitern. Sie soll nur zeigen, wie ein interessiertes Publikum allenthalben angeregt wurde, sich mit Fragen der Geodäsie und insbesondere des Schwerfeldes der Erde auseinanderzusetzen. Dabei wurde jeweils auch auf die Aufgaben und die Bedeutung der Schweizerischen Geodätischen Kommission hingewiesen.

Erfreulicherweise gelang es dem Präsidenten der SGK, in der Beilage «Forschung und Technik» der Neuen Zürcher Zeitung Raum für unsere Anliegen zu erhalten. Neben dem bereits zitierten Beitrag über unser Schwerfeld fand am 27. August 1986 der Aufsatz «Grosstektonische Zusammenhänge im Alpenraum» Aufnahme, der sich auf ein Referat

von Prof. Dr. Stephan Müller (Institut für Geophysik, ETH Zürich) am Symposium über Erdbeben in Brig stützt, organisiert von der Nationalen Schweizerischen Unesco-Kommission. Am 10. September 1986 folgte dann der ausführliche Aufsatz «Satellitensignale vermessen die Erde. Navstar/GPS: das neue satellitengestützte Navigationssystem», von A. Geiger und H.-G. Kahle.

4.3 Fernseh- und Radiosendungen

Am Abend des eigentlichen Festtages wurde vom Schweizer Fernsehen eine Würdigung der beiden Jubiläen ausgestrahlt. Zur Darstellung des Erdschwerfeldes wurde das Computerbild mit den Geoidundulationen (vgl. Abb. 1) gezeigt, nun aber nicht statisch mit der Schweiz im Bildmittelpunkt, sondern dank Video-Technik als eine sich um ihre Achse drehende Erde. Der «Rundflug» um das Geoid wurde vom Institut für Informatik der Universität Zürich als computergraphische Applikation aufgezeichnet und realisiert.

Radio DRS seinerseits brachte im Umfeld des 100-Jahr-Jubiläums der Abteilung VIII der ETHZ im Kulturjournal «Reflexe» mit dem Schwerpunkt Naturwissenschaft, Medizin, Technik eine Darstellung von Unterricht und Forschung in dieser Abteilung. Dabei wurde auch auf das Jubiläum der SGK hingewiesen.

4.4 Die Pressekonferenz vom 12. September 1986

Mit Brief vom 21. August 1986 lud Dr. Rolf Guggenbühl, Stabsstelle Presse und Information der ETH Zürich, die Vertreter von Presse, Radio und Fernsehen auf Freitag, den 12. September 1986, 08.45 Uhr, zu einer kurzen *Pressekonferenz mit anschließender Ausstellungs-Eröffnung* aus Anlass der Jubiläen «125 Jahre Schweizerische Geodätische Kommission» und «100 Jahre Abteilung Kulturtechnik und Vermessung der ETH Zürich» ein.

Ein beachtliches Aufgebot von Medienleuten fand sich zu so früher Stunde in der ETH ein, wo sie über die Bedeutung der beiden Jubiläen informiert wurden. Eine Pressemappe wurde ihnen ausgehändigt, welche die beiden «Festschriften», Kurzberichte und weitere Unterlagen zur Verwendung in der Presse enthielten. Zur Beantwortung von Fragen zur Geodäsie stand Prof. Kahle dienstbereit und geduldig zur Verfügung, sekundiert von Direktor F. Jeanrichard für die Vertreter aus der Romandie. Dieses Frage- und Antwortspiel wurde teils recht hitzig geführt und zeugte von grossem Interesse. Es zog sich entsprechend in die Länge und dauerte bis unmittelbar zum Beginn der Ausstellungs-Eröffnung.

In der Folge dieser Pressekonferenz erschienen in der Presse weitere Berichte zu den Jubiläums-Anlässen.

4.5 Die Exkursion nach Zimmerwald

Mit der Einladung zur Pressekonferenz wurde den Journalisten auch die Möglichkeit angeboten, an der wissenschaftlichen Exkursion nach Zimmerwald teilzunehmen. Ein gutes halbes Dutzend Pressevertreter machte gerne von diesem Angebot Gebrauch und zählte zu den interessierten Besuchern in der Satelliten-Beobachtungsstation.

5. Danksagungen

Die Aufwendungen für die Durchführung der Jubiläumsveranstaltungen hätte das übliche Jahresbudget der SGK bei weitem überstiegen. Die SGK ist deshalb dankbar, dass ihr die *Schweizerische Naturforschende Gesellschaft* (heute Schweizerische Akademie der Naturwissenschaften) zu diesem besonderen Anlass einen namhaften Zusatzkredit zukommen liess.

Dank der gemeinsamen Durchführung des Jubiläums mit der 100-Jahr-Feier der Abteilung für Kulturtechnik und Vermessung der ETH Zürich kam die SGK zudem in den Genuss einer kräftigen Unterstützung durch die *Eidgenössische Technische Hochschule Zürich*, was hier dankbar erwähnt sei.

Zur Deckung weiterer Unkosten wurden von beiden Organisationskomitees gemeinsam eine Reihe von Firmen um finanzielle Unterstützung gebeten, die in grosszügiger Weise gewährt wurde. Es ist der SGK deshalb eine angenehme Pflicht, allen *Spendern* an dieser Stelle für die gewährten finanziellen Beiträge und Dienstleistungen zu danken. Die Liste der Spender findet sich in der Tabelle 4.

Neben diesen finanziellen Leistungen und Dienstleistungen bedurfte es natürlich auch des *persönlichen Engagements* aller Beteiligten. Allen voran sei der derzeitige Präsident der SGK, Prof. Dr. H.-G. Kahle, genannt, der mit jugendlichem Elan und grossem Optimismus die Initiative ergriff und die nötigen Schritte unternahm, damit das 125. Gedenkjahr der Gründung der Schweizerischen Geodätischen Kommission im Jahre 1861 nicht unbeachtet und unbenutzt verstrich. Dabei wurde er von der eingesetzten Planungskommission gebührend unterstützt. Das daraufhin bestellte Organisationskomitee (vgl. Tab. 1) umfasste etliche aktive sowie auch bereits zurückgetretene Kommissionsmitglieder, welche die zusätzliche Aufgabe der Betreuung des ihnen zugewiesenen Ressorts auf sich nahmen. Ohne diesen selbstlosen Einsatz, der nicht genug gewürdigt und verdankt werden kann, wäre das Jubiläum wohl nicht das geworden, was es war. Ein besonderer Dank gebührt dabei Herrn Dr. Rolf Guggenbühl, Pressechef der ETH Zürich, der als «ausserstehendes» Mitglied des Organisationskomitees seine Aufgabe als Pressechef mit grosser Fachkompetenz und persönlichem Einsatz wahrnahm.

Ein Höhepunkt des gemeinsamen Jubiläums war zweifellos der *Festvortrag* von Prof. Dr. R. Sigl. Ihm gebührt nicht nur

ETH Zürich (Eidgenössische Technische Hochschule Zürich)	IBM (Schweiz), Zürich
SNG (Schweizerische Naturforschende Gesellschaft)	ISOMAT-Bau AG Abdichtungen für Hoch- und Tiefbau, Zürich
SVVK (Schweizerischer Verein für Vermessung und Kulturtechnik) Gruppe der Freierwerbenden	Kern & Co. AG Präzisionsmechanik und Optik, Aarau
Aerni-Leuch AG Lichtpaus- und Verpackungstechnik, Reprographische Betriebe, Liebefeld	Werner Maag AG Guss- und Kunststoffherzeugnisse, Zürich
Bachema AG Institut für chemische und bakteriologische Untersuchungen, Zürich	Rittmeyer AG Mess- und Leittechnik für die Wasser- und Ener- giewirtschaft, Zug
Basler Versicherungs-Gesellschaft, Basel	Sarna Kunststoff AG, Sarnen
Berner Allgemeine Versicherungs-Gesellschaft, Bern	Schweiz. Lebensversicherungs- und Rentenanstalt, Zürich
Bundesamt für Landestopographie, Wabern	Schweiz. Rückversicherungs-Gesellschaft, Zürich
Collioud & Co. Repro und Druck, Bern	Thécla SA Matriçage à chaud (Warmpressteile), St-Ursanne
Diagonal Verlags AG, Baden	Verein Schweiz. Zement-, Kalk- und Gips-Fabrika- nten, Zürich
Eckardt Natursteine AG, Zürich	Wild Heerbrugg AG Werke für Optik und Elektronik, Heerbrugg
Geodetic & Construction Survey Ltd. H. R. Keller, Zug	WISAG Wissenschaftliche Apparaturen und Industrie- anlagen AG, Zürich
Franz Gysi AG Armaturen und Dichtungen, Suhr	Züllig AG Apparatebau für die Wasserwirtschaft, Rheineck

Tab. 4: Die Liste der Spender.

der Dank der SGK, sondern ebenso sehr der Abteilung VIII. Aber auch die *Fachvorträge* vom Freitag nachmittag waren anspruchsvoll und zeugten von einem verdankenswerten Effort der sie bestreitenden Kommissionsmitglieder.

Die beiden *Exkursionen* vom Samstag sind den Teilnehmern sicher noch in angenehmer und dankbarer Erinnerung. Bei der Rigi-Exkursion hatten sich eine ganze Reihe von Kollegen zum guten Gelingen eingesetzt: Dr. A. Elmiger (Exkursionsleiter), Direktor F. Jeanrichard, Dr. N. Pavoni, Dr. H. Aeschliemann, E. Gubler, B. Bürki, A. Geiger, A. Wiget und, last but not least, W. Schneibel, der mit seinen schönen Alphornklängen alle Teilnehmer – und viele weitere Berggänger dazu –

erfreute. Beim Besuch in der Satelliten-Beobachtungsstation Zimmerwald wurden die Gäste von Dr. W. Gurtner (Exkursionsleiter) und PD Dr. I. Bauersima betreut.

Dank gebührt schliesslich aber auch allen «Festbesuchern» aus nah und fern, die mit ihrem Erscheinen ihr Interesse an der schweizerischen Geodäsie bekundeten und dafür sorgten, dass die SGK ihr Jubiläum nicht «unter sich» begehen musste.

So möge nun noch ein Vertreter einer befreundeten Organisation, Prof. F. Barlier, zu Wort kommen, der mit seinem nachstehend wiedergegebenen Schreiben den Dank für alles Erlebte ausdrückt.

COMITÉ NATIONAL FRANÇAIS DE GÉODÉSIE ET GÉOPHYSIQUE

SECTION I - GÉODÉSIE

Président : F. BARLIER
CERGA
Avenue Copernic
06130 GRASSE
tél. (93) 36.58.49
télex : CERGA 470 865 S

Secrétaire : C. BOUCHER
IGN
2, avenue Pasteur
94160 St-Mandé
tél. 374.12.15 - p. 2501
télex : IGN SMD 210 551 F

Grasse September 15, 1986

Professor Dr. H-G KAHLE
President of the Swiss
Geodetic Commission

N Réf/45/86/FB/CB

Dear colleague,

I would like to thank you very much for your very kind invitation for allowing me to attend the 125 years Swiss Geodetic Commission.

I have appreciated the dynamism and the importance of the Swiss Geodetic Commission, in continuation of a very old tradition. As you know, we have also a long tradition to work together and I wish it will continue in the future as well as it was in the past.

I enjoyed your presentation giving me a good occasion to practice my German. The banquet was also a very pleasant moment, specially thanks to Dr. Jean-Richard, his wife but also to the other colleagues of our table number 12.

I had also a good opportunity to visit the Zimmerwald station and to appreciate the very interesting work performed by your colleagues. Thank you very much for everything.

Looking forward to seeing in another occasion.

F. BARLIER

