

Zeitschrift:	Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik : VPK = Mensuration, photogrammétrie, génie rural
Herausgeber:	Schweizerischer Verein für Vermessung und Kulturtechnik (SVVK) = Société suisse des mensurations et améliorations foncières (SSMAF)
Band:	84 (1986)
Heft:	6
Artikel:	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
Autor:	Bürki, B. / Kahle, H.-G. / Vermaat, E.
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-233043

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 14.01.2026

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

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

B. Bürki, H.-G. Kahle, E. Vermaat, D. Van Loon

Spektakuläre Weltraumunternehmungen der NASA und ESA, wie z.B. die bemannten Mondlandungen (APOLLO), die Flüge der PIONEER- und VOYAGER-Sonden durch unser Planetensystem oder der GIOTTO-Sonde zum Kometen HALLEY haben seit jeher die Aufmerksamkeit der Öffentlichkeit auf sich gelenkt. Weniger bekannt ist ein weltweites Forschungsprogramm, das die NASA eigens für langfristige Studien der heute noch andauernden rezenten Erdkrustenbewegungen zur Erdbebenvorhersageforschung initiiert hat: das globale Geodynamik-Projekt (CDP). Wie sieht der wissenschaftliche Hintergrund dieses Projektes aus, welche modernen Techniken sind dazu entwickelt worden, was wird gemessen und welches sind die langfristigen Ziele? Im folgenden wird versucht, diese Fragen in einer kurzen Zusammenfassung zu beantworten und dabei den Zusammenhang zwischen den im Herbst 1985 auf dem Monte Generoso durchgeföhrten Laser-Satellitenmessungen und dem globalen Programm aufzuzeigen. Die Auswertungen der Messungen sind zur Zeit im Gange und werden zu gegebener Zeit veröffentlicht.

Les missions spatiales spectaculaires de la NASA et de l'ESA, à savoir les atterrissages d'engins habités sur la lune (APOLLO), les vols des sondes PIONEER et VOYAGER à travers notre système planétaire, le voyage de la sonde GIOTTO vers la comète HALLEY, ont, de tout temps, attiré l'attention du grand public. La NASA initia aussi un programme mondial de recherches, moins connu celui-ci, nommé le «projet global de géodynamique» (CDP). Cette entreprise a pour but d'étudier les mouvements récents – toujours actifs – de l'écorce terrestre, afin de pouvoir améliorer les recherches sur la prévision des tremblements de terre. Quel est le contexte scientifique de ce projet, quelles sont les techniques modernes développées jusqu'à présent, que mesure-t-on au juste et quels sont les objectifs à long terme? Le résumé suivant tente de répondre à ces questions ainsi que de mettre en évidence les rapports entre les mesures au laser sur satellites (effectuées en Suisse, en automne 1985) et le programme global de la NASA. Une prochaine publication informera sur l'évaluation des résultats.

1. Einleitung

Seit dem 4. Mai 1976 zieht ein speziell für die Erdbebenforschung entwickelter Satellit der NASA im 3½-Stunden-Rhythmus in einer nahezu kreisförmigen Bahn um die Erde: der Laser Geodynamics Satellite (LAGEOS). Die Oberfläche dieses nur 60 cm grossen kugelförmigen künstlichen Erdtrabanten ist mit 422 Quarz- und 4 Germanium-Reflektoren ausgestattet, die wie «Katzenaugen» von der Erde ausgestrahlte Laserstrahlen reflektieren können (Abb. 1). Aufgrund seiner relativ grossen Höhe (ca. 6'000 km) kann LAGEOS von sehr weit auseinanderliegenden, auf der Erde stationierten Lichtsendern gleichzeitig angezielt werden.

Die Bahnelemente von LAGEOS sind in der Tabelle 1 zusammengestellt. Mit der Kenntnis der Satellitenposition wird dadurch eine *interkontinentale* Vermessung der Erdoberfläche möglich, die sich im Prinzip mit der Triangulation in der Landesver-

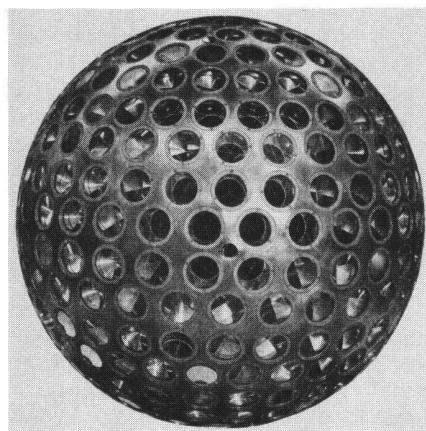


Abb. 1: Ansicht des LAGEOS (LAser GEodynamics Satellite).

messung vergleichen lässt. Dabei werden allerdings keine beweglichen Satelliten, sondern hohe Bergspitzen als Zielobjekte anvisiert. Das grosse wissenschaftliche Potential des satellitengeodätischen Konzepts besteht nun nicht allein darin, die Koordinaten der Senderstationen in einem globalen geozentrischen kontinentüber-

greifenden Bezugssystem zu erhalten, sondern durch Wiederholungsmessungen deren zeitliche Änderungen zu bestimmen.

Bahnelemente LAGEOS (Cohen & Smith, 1985)

Grosse Bahnhalbachse a	12 265 km
Abnahme von a	– 1.1 mm/Tag
Exzentrizität	0.004
Inklination	109.8°
Perigäumshöhe	5 858 km
Apogäumshöhe	5 958 km
Perigäumsrate	– 0.214°/Tag
Drehung der Knotenlage	+ 0.343°/Tag

Der letzte Gesichtspunkt ist insofern von Bedeutung, als dass unsere Erdoberfläche nicht aus einer starren, zusammenhängenden Gesteinsschicht besteht, durch die die Kontinente und Ozeanböden fest miteinander verbunden sind: eine Erkenntnis, die bereits der deutsche Meteorologe Alfred Wegener vor 70 Jahren in seiner bekannten Hypothese der Kontinentalverschiebung ausgesprochen hat. In den letzten 25 Jahren sind in der experimentellen Forschung wichtige Fortschritte erzielt worden, die die Theorie von WEGENER in einem neuen Licht erscheinen lassen, und die man mit dem Begriff «Globale Platten tektonik» überschreibt. Danach verschieben sich nicht die Kontinente relativ zueinander, sondern die sogenannten *Lithosphärenplatten*. Sie sind bis zu 150 km mächtig und können jeweils sowohl kontinentale als auch ozeanische Krustenteile enthalten. Die Grenzen dieser Platten fallen nicht mit den Küstenlinien zusammen, sondern mit den grossen Erdbebengürteln der Erde. Abbildung 2 zeigt die globale Verteilung der Lithosphärenplatten: Es sind dies die 6 grösseren Platten Eurasia, Afrika, Amerika, der Pazifik, Indien/Australien und die Antarktis, sowie die 5 kleineren Platten: Nazca, Cocos, Karibik, Arabien und die Philippinische See. In unserer nächsten Nachbarschaft liegt die adriatisch/apulische Region, die als mögliche weitere kleine Platte angesehen werden kann. Nach den Erkenntnissen der globalen Platten tektonik gibt es im wesentlichen drei Bewegungsvorgänge: (1) In einigen Zonen gleiten die Platten horizontal aneinander vorbei. (2) In anderen Gebieten kommt es zu Kollisionen oder (3) zum Auseinanderdriften. Das bekannteste Beispiel für horizontales Vorbeigleiten ist die San Andreas-Verwerfung, Kalifornien. In Europa/Vorderasien ist es z.B. die Nordanatolische Verwerfung, in Lateinamerika die Bocono-Verwerfung. Kollisionszonen zeigen sich morphologisch als Tiefseegräben (z.B. Peru/Chile Graben) oder alpidische Gebirgsgürtel (Himalaya, Alpen). Gebiete mit divergenterem Bewegungssinn sind die kontinentalen Riftsysteme (z.B. Rhein graben, Olsogruben, Ostafrikanischer Graben) und die mittelozeanischen Rücken.

Die Bewegungsraten der Lithosphärenplatten liegen in der Grössenordnung von mehreren cm/Jahr. Im Verlaufe der o.g. drei Bewegungsvorgänge kommt es zu seitlichen Verschiebungen sowie zu Ober- und Unter-

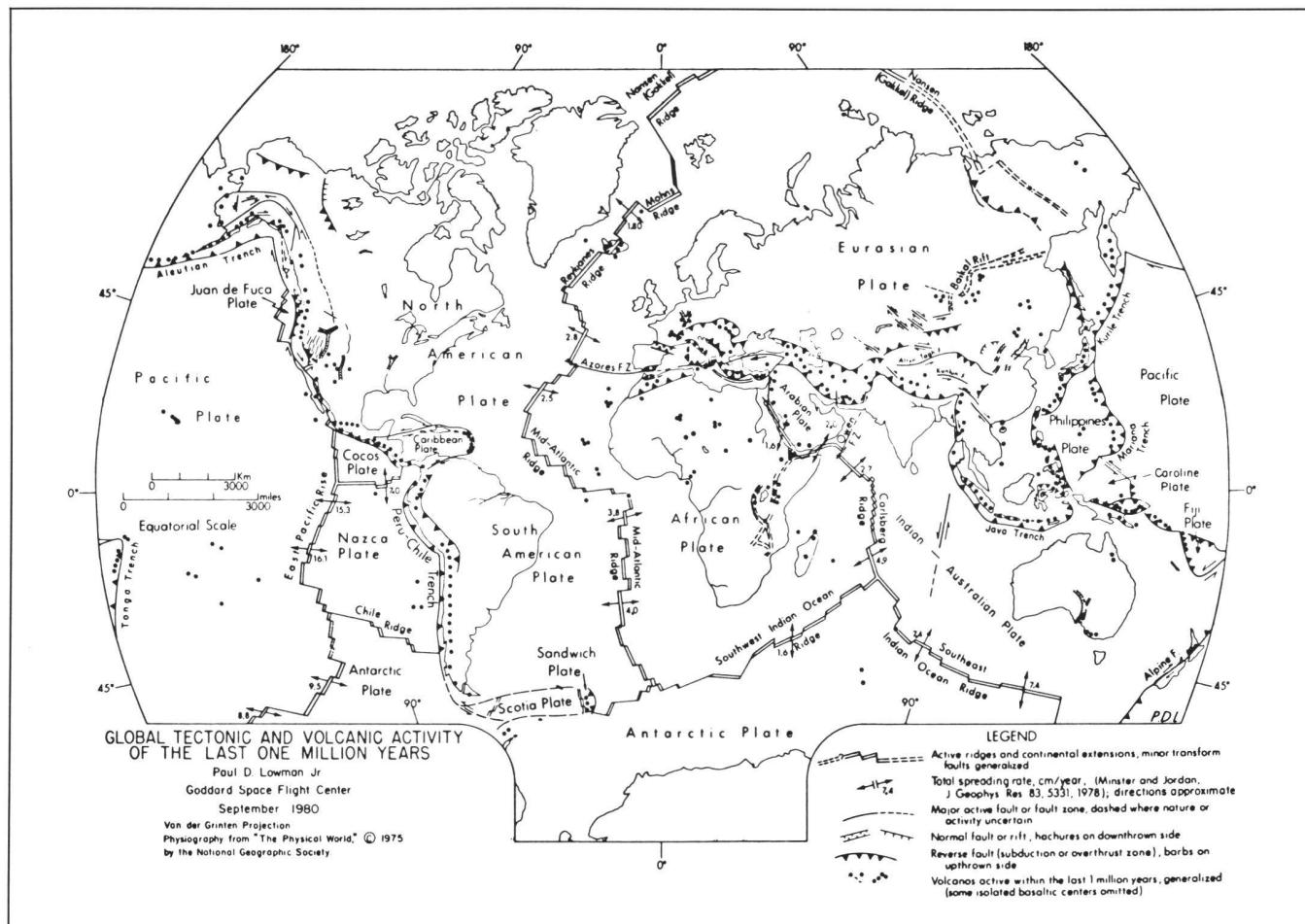


Abb. 2: Verteilung der Lithosphärenplatten (Lowman, 1980). Die Ziffern entlang den mittelozeanischen Rücken geben die Bewegungsraten der Platten in cm/Jahr wieder.

schiebungen. Dabei entstehen grosse Zug- und Druckspannungen, die sich in energiereichen Erdbeben und Vulkaneruptionen entladen. Aktuelle Beispiele für solche Erdbeben sind das verheerende Ereignis von Mexiko am 19. September 1985, als sich die Cocos-Platte unter die amerikanische Platte schob oder die Erdbebenfolgen von Friuli im Jahr 1976, als die Apulische Platte unter der Eurasischen Platte abtauchte. Folgenschwere 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).

Das Ziel von NASA's globalem Geodynamik-Projekt (Crustal Dynamics Project, CDP) besteht darin, die Bewegungen der Lithosphärenplatten hinsichtlich ihrer Richtung und Geschwindigkeit mit höchster Präzision zu erfassen und deren räumliche und zeitliche Änderungen zu lokalisieren. Der wissenschaftliche Hintergrund des CDP wurde von Coates (1984) im globalen sowie von Wilson et al. (1984) und St. Mueller et al. (1985) im europäischen Rahmen beschrieben. Neue Technologien, die in der Satellitengeodäsie (Satellite Laser Ranging [SLR], Global Positioning System - Verfahren [GPS]) und in der Very Long Baseline Interferometry [VLBI]

Eingang gefunden haben, sollen hierzu Beiträge liefern. Erste Ergebnisse des CDP sind kürzlich (September 1985) in einem Sonderband der U.S. Zeitschrift «Journal of Geophysical Research, Vol. 90, No. B11» publiziert worden. Die technische Konzeption des im vorliegenden Artikel beschriebenen Modular Transportable Laser Ranging Systems 2 (MTLRS 2) wurde von Vermaat et al. (1984) ausführlich diskutiert. Laufende Beiträge über den Einsatz dieses Systems werden im MTLRS-2 Bulletin von der Satellitenbeobachtungsstation Kootwijk der TU Delft periodisch veröffentlicht. Einzelergebnisse der verschiedenen Teilprojekte findet man im Crustal Dynamics Data Information System Bulletin (z.B. Vol. 1, No. 2, Dezember 1985 für SLR).

Die Messungen auf dem Monte Generoso sollen die Grundlage zur späteren Bestimmung der gegenwärtigen Bewegung der Alpen liefern, die im Bereich des Kollisionsprozesses zwischen der eurasischen und afrikanischen Platten liegen. Ein zweiter schweizerischer Beobachtungspunkt ist die permanente Satellitenbeobachtungsstation des Astronomischen Instituts (AI) der Universität Bern, Zimmerwald, die ebenfalls mit Laserlicht-Impulsen die Bahn des LAGEOS vermisst.

2. Beschreibung des Laser-teleskop-Messsystems

MTLRS ist die Bezeichnung für das mobile Laserdistanz-Messsystem, das vom Technisch Physischen Dienst (TPD) und der Technischen Universität Delft, NL, entwickelt worden ist. 1985 wurden 2 identische Systeme fertiggestellt.

- MTLRS-1 für das Institut für Angewandte Geodäsie (IFAG), Frankfurt a.M.
- MTLRS-2 für die TU Delft.

Der wichtigste Teil des MTLRS besteht aus einem Teleskop, das einen Impuls-Laserstrahl zum Satelliten abstrahlt und die reflektierten Signale wieder empfängt. Der von einer sehr leistungsfähigen Laserquelle erzeugte Strahl ist nicht kontinuierlich, sondern besteht aus einer Folge von 10 Pulsen pro Sekunde. Um den für das Teleskop unsichtbaren LAGEOS-Satelliten präzise verfolgen zu können, ist das Teleskop mit Servomotoren ausgerüstet und automatisch nachführbar. Die Steuerung erfolgt durch einen Computer, der in einer Kabine untergebracht ist. Das Teleskop, das zu Transportzwecken in der Kabine Platz findet, wird für die Beobachtungen auf Schienen ausgefahren und in Position gebracht. Die Laserquelle ist beim Teleskop angebaut. Sie braucht ein Kühlaggregat, um die

Wärme abzuführen. Neben dem Steuercomputer befinden sich in der Kabine noch sämtliche elektronischen Komponenten und Systeme, die für den Betrieb notwendig sind.

3. Zur Funktionsweise des MTLRS

Die Distanz zum Satelliten wird durch Laufzeitmessung von Lichtimpulsen gemessen. Die Laserquelle erzeugt sehr kurze Lichtblitze mit einer Pulsbreite von ca. 6 cm. Dies entspricht einer Pulsdauer von 2×10^{-10} Sekunden. Die Pulse lösen beim Austritt einen elektronischen Zähler aus, der die Anzahl Schwingungen misst, bis der «zurückgekehrte» Puls den Zähler stoppt. Bei genügend hoher Auflösung des Zählers kann man die Zeit berechnen, die der Lichtpuls für die Strecke Teleskop-Satellit-Teleskop benötigte. Die «einfache» Strecke ergibt sich aus der Formel

$$S = \frac{1}{2} ct$$

wobei c die Lichtgeschwindigkeit und t die Flugzeit darstellen. Bei einer durchschnittlichen Entfernung des LAGEOS-Satelliten von 6000 km werden Flugzeiten

$$\text{von ca. } t = \frac{2 S}{c} = \frac{2 \cdot 6000}{300000} = 0.04 \text{ Sek.}$$

gemessen. Um diese Distanzen mit einer Genauigkeit von 1 cm bestimmen zu können, muss das System die Flugzeit mit einer Genauigkeit von 6×10^{-11} s auflösen können. Die reflektierten Pulse sind so schwach, dass nur von jedem zehnten abgestrahlten Puls ein Photon detektiert wird. Man spricht hier von der «single photon technique», die ausserordentlich hochempfindliche Photoelektronenvervielfacher benötigt, um die schwachen Signale zu detektieren und zu verstärken. Während eines Satellitendurchgangs von ca. 50 min. Dauer werden ungefähr 30 000 Pulse abgestrahlt. Die Anzahl der detektierten Pulse schwankt – je nach meteorologischen

Verhältnissen – zwischen 100 und ca. 7000.

4. Technische Daten zu MTLRS nach Visser und Vermaat (1985)

Grösse des Teleskops:	ca. 1.2 x 1.2 x 1.2 m
Durchmesser des Objektivs:	40 cm
Gewicht des Teleskops, inkl. Laserquelle:	1500 kg
Antrieb:	Computergesteuerte Servomotoren für die Nachführung in Azimut und Elevation
Zeitsystem (Frequenznormal):	Cäsium
Satellitenempfänger für Zeitvergleich:	FTS 8400 GPS Satellite-Timing Receiver
Laserquelle:	Kristalloptik, BRD Nd-YAP-Kristalle (Neodym-Yttrium-Aluminium Perovskit), erzeugt im Infrarotbereich, mit Frequenzverdoppelung
Wellenlänge:	539 nm (grün)
Pulsdauer:	ca. 250 ps
Pulsenergie:	10 mJoule
Wiederholrate:	10 Hz
Temperaturbereich:	-20°C bis ±50°C
Zähler für Flugzeitmessung:	HP 5370
Hauptrechner:	HP 1000 L
Peripherie	
Prozessoren:	2 x MC 6809
Photoelektronenvervielfacher:	RCA 8850
Energiebedarf (inkl. Kühlaggregat und Klimaanlage)	ca. 6 kW

5. Vorbereitungen der Messkampagne. Transport des Laser-Vermessungssystems und Vermarkung

Nachdem die erste Beobachtungsreihe auf dem Gelände der Satellitenbeobachtungsstation der TU Delft in Kootwijk erfolgreich abgeschlossen war und erste Parallelmessungen mit dem stationären Laser auf der Satellitenbeobachtungsstation des IfAG Frankfurt und der TU München in Wettzell ausgeführt waren, begann die Bewährungsprobe des neuen MTLRS-2 am 3. September 1985 auf dem Monte Generoso, Kanton Tessin. Die Vorbereitungsarbeiten für den zweimonatigen Einsatz des Laser-Teleskops endeten mit dem Transport der empfindlichen Apparatur zum vorgesehenen Beobachtungsplatz (1700 m.ü.N.N.) vor dem Hotel Albergo Vetta. Die einzige Transportmöglichkeit besteht aus

einer Zahnradbahn, die von der Talstation Capolago am südlichen Ende des Lagonersees zur ca. 100 m unterhalb des Generoso-Gipfels gelegenen Bergstation Vetta führt. Die Strecke ist eingleisig und weist ca. 5 Tunnels auf. Da die normalerweise für MTLRS-2 verwendete Kabine zu gross ist, musste eine spezielle Minikabine konstruiert werden, die einerseits ohne Probleme auf der Schmalspurbahn transportiert werden konnte und anderseits genügend Schutz für die Elektronik und die Bedienung des Teleskops bot. Für kurze Verschiebungen an Ort und Stelle ist die Minikabine mit 4 kleinen Rädern ausgerüstet, die es erlauben, die Kabine mit Unterstützung von 3 bis 4 Mann zu bewegen. Der ursprüngliche Plan, das Teleskop auf dem Gipfel zu installieren, musste aus topografischen Gründen geändert werden. Dies hatte einen gewissen Nachteil hinsichtlich der Rundsicht in Richtung N-NO zur Folge. Dadurch konnten in diesem Sektor keine terrestrischen Ziele angezielt werden.

Erste Bemühungen, das Teleskop in Capolago mit Hilfe des hydraulischen Bordkrans der Diesellokomotive auf den bereitgestellten Gütertransportwagen zu heben, scheiterten zunächst. Der Kran vermochte das anderthalb Tonnen schwere Teleskop um keinen Zentimeter in die Luft zu heben, obwohl die am Kran angebrachte Plakette eine Hebelast von bis zu 3 Tonnen versprochen hatte. Erst nachdem die Ausladung des Krans auf das absolute Minimum beschränkt worden war, gelang das Verlade manöver (Abb. 3). Nach insgesamt 4 Stunden der Verladearbeit war die gesamte Ausrüstung, verteilt auf zwei Niederbordwagen, verladen und festgezurrt (Abb. 4). Damit die zu erwartenden Erschütterungen während der Bahnfahrt dem Teleskop nicht schadeten, wurde ein spezieller Unterbau mit regulierbaren Luftkissen als Federelemente und Stoßdämpfern auf den Boden des Bahnwagens gelegt. Diese Vorrichtung war ausserdem mit einer Neigung von ca. 10 Grad in der Längsachse versehen, um die maximale Steigung von 22% auszugleichen.

Nach problemloser Fahrt wurde das Verladegut auf dem «Bahnhof» der Bergstation unversehrt abgeladen. Dazu musste der Fahrstrom kurzzeitig abgeschaltet werden, weil der Bordkran fast die Oberleitung berührte.

Die Installation des Beobachtungsstandortes erfolgte nach den Richtlinien, die von der NASA im Rahmen des CDP für die Installationen vorgeschrieben worden waren. Für das Teleskop-Fundament einerseits und für die Punktversicherungen anderseits wurden je 3 Betonblöcke mit den Dimensionen 0.5 x 0.5 x 0.5 m errichtet. Zusammen mit den 2 Versicherungsbolzen, die in die bestehende Mauer eingelassen wurden, besteht die Punktversicherung aus 5 Punkten. Sie bilden ein kleines Netzwerk, auf das die genaue Teleskop-Position eingemessen wurde. Die Punktgruppe selbst bezog sich auf Punkte 1. Ordnung

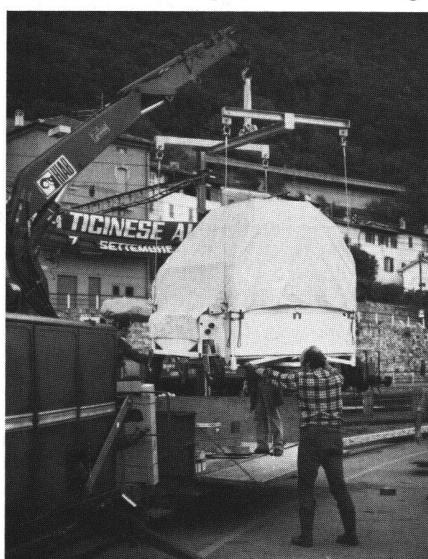


Abb. 3: Verlad des MTLRS 2-Teleskops auf einen Güterwagen der Monte Generoso Bahn in Capolago, Tessin.

Partie rédactionnelle

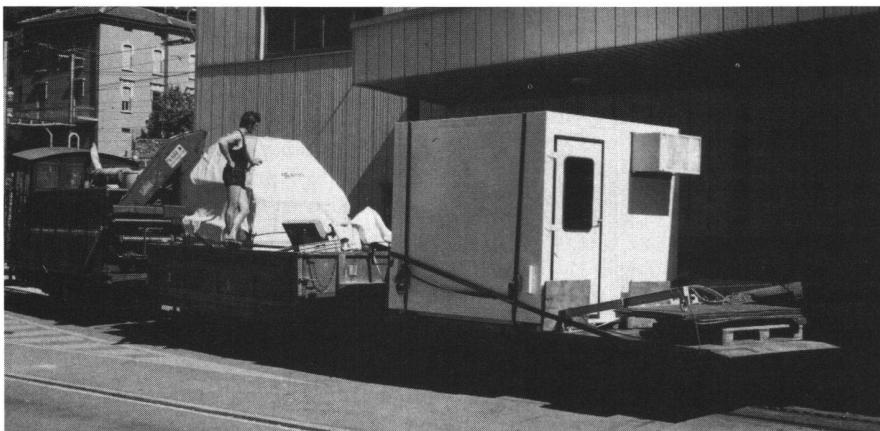


Abb. 4: Zugskomposition mit der gesamten Ausrüstung zum Transport bereitstehend. Vor der Diesel-Lokomotive ist das Teleskop sichtbar, das auf einem luftgefedernten Transportrahmen steht, der mit einer Neigung in Längsachse konstruiert wurde, um die Steigung der Strecke von 22% auszugleichen. In der Kabine sind das elektronische Steuersystem inkl. Computer sowie die Klimageräte untergebracht.



Abb. 5: Die eingerichtete MTLRS 2-Messstation auf Monte Generoso. Das Laserteleskop ist im Vordergrund sichtbar. In der klimatisierten Kabine sind die Elektronik und die Computersysteme untergebracht. Das Zelt dient als Stauraum und als Befehlswerkstätte für Reparatur- und Unterhaltsarbeiten.

des Landesnetzes der Schweiz und des Europäischen Triangulationsnetzes RET-
rig. Daraus konnte man die geozentrischen Koordinaten für die Satellitenmessungen verwenden.

Ein besonderes Problem war die Stromversorgung der Messstation. Weil die Haussziale des Hotels keine zusätzliche Entnahme von elektrischer Energie erlaubte, musste eine spezielle Leitung von ca. 200 m Länge zur Trafostation des Elektrizitätswerkes gelegt werden.

6. Inbetriebnahme der Station

(Abb. 5)

Nach Sicherstellung der Stromversorgung (ca. 6 kW) erfolgte die Inbetriebnahme der Zeitanlage. Das dazugehörige hochgenaue Zeitnormal (Cäsium-Uhr) benötigte ca. 24 Stunden Aufwärmzeit, um die geforderte Stabilität zu erreichen. Für die Synchronisation mit dem Zeitsystem der Satelliten wurde außerdem ein GPS-Empfänger vom Typ Satellite Timing Receiver FTS

8400 eingesetzt, der nicht nur den Bezug zwischen den verschiedenen Zeitsystemen sicherstellte, sondern auch die Stationskoordinaten (global) mit einer Genauigkeit von ungefähr 2 m bestimmte.

Im nächsten Schritt musste der geodätische Bezug zum örtlichen Netz der 5 Versicherungspunkte hergestellt werden. Diese Messungen erfolgten mit einem auf dem Teleskop montierten Hilfslaser (Abb. 6). Zusammen mit den Entfernungsmessungen zu den Versicherungspunkten wurde die Punktbestimmung des Teleskops im System der Versicherungspunkte durchgeführt. In den nächsten routinemässigen Programmschritten wurden die astronomischen Ortsparameter und sowie die genaue Azimutausrichtung bestimmt, um den Bezug zum Fixsternhimmel herstellen zu können. Diese Aufgabe ist besonders wichtig, weil das Teleskop genau auf die vorausberechneten Bahnpositionen gerichtet sein muss, wenn der (optisch nicht sichtbare) Satellit mit dem pulsierenden Laserstrahl getroffen

werden soll. Man kann sich dieses Szenario folgendermassen vorstellen:

Der Satellit, eine Kugel von 60 cm Durchmesser, fliegt mit einer Geschwindigkeit von ca. 8 km/s entlang der Ostküste der U.S.A. Die Aufgabe des Beobachters besteht nun darin, dieses Objekt von Europa aus anzuvisieren, auf seiner Flugbahn zu verfolgen und ständig mit dem Laserstrahl zu treffen. Außerdem muss für jeden Puls die Flugzeit gemessen und im Computer abgespeichert werden. Ein solches Vorhaben hängt vom einwandfreien Funktionieren sämtlicher System-Komponenten ab.

7. Das Beobachtungsprogramm

Entsprechend den Vereinbarungen mit der TU Delft waren verschiedene Beobachtungen vorgesehen:

- In erster Priorität sollten die geozentrischen Koordinaten der Station Monte Generoso bestimmt werden. Dazu sollte der NASA-Satellit LAGEOS so oft wie möglich verfolgt und «gemessen» werden.
- Nach Möglichkeit sollte gleichzeitig mit dem Laserteleskop der Satellitenbeobachtungsstation der Universität Bern in Zimmerwald das gleiche Programm gemessen werden, was die Bestimmung der Basislinie zwischen den beiden Stationen ermöglichte.
- Gleichzeitig erfolgten Lasermessungen von anderen europäischen Laserbeobachtungsstationen, sowie einigen in Übersee.
- Im Rahmen einer Versuchsreihe sollte der Versuch unternommen werden, mit Hilfe des «Satellitenlasers» auch terrestrische Distanzen zu messen.

Durch die Wahl des Punktes auf Monte Generoso (1650 m ü.M.) bestand die Möglichkeit, die Distanz (ca. 106 km) zum Jungfraujoch (3746 m ü.M., Höhenwinkel ca. 1°) versuchsweise zu messen. Dabei stand die Frage im Vordergrund, ob es möglich ist, mit dem Laser die atmosphärischen Lufschichten auf eine so grosse Distanz horizontal zu durchdringen. (Die Dicke der praktisch senkrecht durchstossenden Lufschichten bei Satellitenbeobachtungen entspricht einer horizontalen Visurlänge von lediglich ca. 8 km und ist damit bedeutend geringeren Absorptionen und Streuungen unterworfen.)

8. Die Satellitenmessungen

Der erste Durchgang von LAGEOS wurde am 18. September 1985 gemessen. In der Folge erlaubte die hervorragende, wochenlang stabile Wetterlage die Messung von insgesamt 46 Passagen. Die atmosphärischen Verhältnisse waren dabei mitentscheidend, dass der Satellit oft bereits in einer Höhe von 15° über dem Horizont im auf- und absteigenden Bahnsegment gemessen werden konnte. Dementsprechend hoch fiel auch die Anzahl der detektierten Pulse aus. Sie war zeitweise so hoch, dass

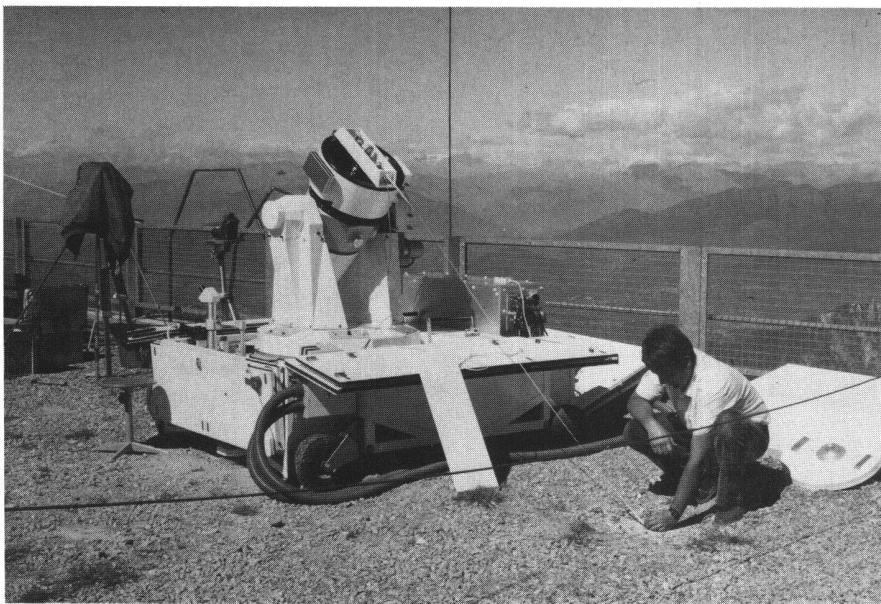


Abb. 6: Einmessen des genauen Teleskop-Standortes bezüglich der 5 Versicherungsbolzen, die in massiven Betonklötzen eingelassen sind. Die Messungen erfolgen mittels eines Stahl-Messbandes und eines Hilfslasers, der an der Front des Teleskops montiert ist.

die vom Programm vorgesehenen (reservierten) Speicherplätze für die Durchführung von statistischen Berechnung (data-screening) «überfüllt» wurden. Die sehr günstige Messphase wurde auch vom Beobachtungsteam des AI der Universität Bern (Gurtner und Schildknecht) ausgenutzt. Dank guter Zusammenarbeit konnten ca. 20 LAGEOS-Durchgänge auf beiden Stationen simultan beobachtet werden.

Neben diesen beiden schweizerischen Stationen waren gleichzeitig noch andere

Laserstationen in Europa in Betrieb. Die geographische Verteilung der Laserstationen und das entsprechende geodätische Netz sind in Abbildung 7 dargestellt.

9. Die terrestrischen Messungen

Ein interessanter Versuch bestand darin, die Basislinie vom Monte Generoso nach Zimmerwald terrestrisch zu vermessen. Weil die Alpenkette eine direkte Sicht verhindert, wurde auf dem Jungfraujoch ein Zwischenpunkt eingeschaltet, der sich von beiden Laserstationen anzielen liess. Aus-

gewählt wurde die Terrasse von der PTT-Richtstrahlstation «Grathaus» am Ostgrat der Jungfrau, in einer Höhe von 3746 m ü. Meer. Diese mit bester Infrastruktur ausgerüstete Hochgebirgsstation ist durch einen Stollenzugang vom Jungfraujoch-Bahnhof aus erreichbar. Damit ergab sich die Möglichkeit, die Basislinie Zimmerwald-Generoso auf 2 verschiedene Arten zu messen:

1. Durch Simultanmessungen zum LAGEOS-Satelliten.
2. Durch direktes Messen der Teilstücke von beiden Endstationen zum Grathaus Jungfraujoch mit anschliessender Reduktion auf die gradlinige Verbindung (Basislinie).

Für das Messen der Distanz Generoso-Grathaus wurde freundlicherweise ein AGA-Reflektorpaket von der Universität Bologna (Prof. Susanna Zerbini) zur Verfügung gestellt. Es bestand aus 18 Einzelprismen. Dank dem einwandfreien Funktionieren der Handsprechfunkgeräte (auf 106 km Entfernung) konnte der Versuch gestartet werden, die Distanz zu messen. Die erste Schwierigkeit besteht dabei im Auffinden des Ziels. Zunächst wurde das Teleskop auf die berechneten Werte für Azimut und Höhe eingestellt. Danach signalisierte der Betreuer der Reflektoren auf dem Jungfraujoch seinen Standort, indem er einen 2 kW-Halogenscheinwerfer einschaltete. Bei guten atmosphärischen Verhältnissen ist diese Lichtquelle weit über hundert Kilometer sichtbar. Vom Monte Generoso aus konnte die im Fernrohr sichtbare kleine Lichtquelle ausgemacht und genau angezielt werden. Damit war das Teleskop auf ca. 20–50 m genau auf die Reflektoren ausgerichtet. Nun wurde die Laserquelle eingeschaltet. Der stark gebündelte Lichtstrahl bewirkte auf der Gegenstation eine

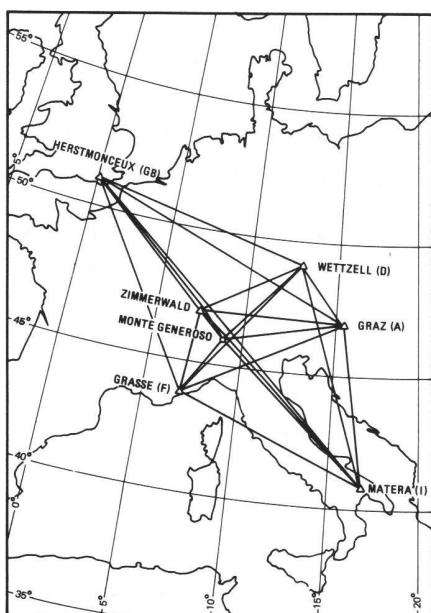


Abb. 7: Netzplan mit den europäischen Satellitenbeobachtungsstationen, die zur Zeit der Generoso-Messungen satellitengeodätisch vermessen wurden. Mit Hilfe der Simultanbeobachtungen lässt sich das eingezeichnete Netzwerk von Basislinien mit hoher Genauigkeit ausgleichen.



Abb. 8: MTLRS 2 beim Messen der Distanz Monte Generoso–Jungfraujoch. Die zwei Teilstrahlen entstehen durch Aufspaltung des Hauptstrahls. Das «blaue» Zentrum der Optik, wo ein Hilfsfernrohr zur Detektion von Flugzeugen oder der Sonne montiert ist, wird dadurch ohne Energieverlust ausgeblendet. Im unteren Bildteil sind die Lichter von Lugano sichtbar. Die Entfernung zum Jungfraujoch beträgt ca. 106 km.



Abb. 9: GPS-Antenne (TI 4100) während der Messung auf Monte Generoso. Im Gegensatz zu den Lasermessungen, bei denen jeweils ein passiver Satellit angezielt wird, beruht das GPS-Verfahren auf der Messung von Radiowellen, die gleichzeitig von mehreren aktiven Satelliten empfangen werden.

grellgrüne Erhellung der im unmittelbaren Lichtkegel gelegenen Situation. Bei voller Leistung des Lasers, der in dieser Entfernung einen Durchmesser von 3–4 Metern aufwies, war die Blendwirkung so stark, dass der Beobachter nicht direkt in den Strahl blicken durfte. Bei sehr gutem Wetter war sogar der auf dem Monte Generoso empfangene Reflex des Reflektors vom Jungfraujoch noch so grell, dass er stark blendete. Der Beobachter beim Reflektor konnte sodann dem Operateur am Teleskop per Funk Anweisungen zum punktgenauen Ausrichten des Laserstrahls durchgeben. Die anschliessende Messung erfolgte mit stark reduzierter Leistung (ca. 1%) des Lasers. Im Verlauf der Kampagne

gelangen insgesamt 21 Messungen vom Generoso zum Jungfraujoch (Abb. 8). Die Abweichung zwischen der kürzesten und längsten gemessenen Distanz betrug lediglich 49 cm, bei noch nicht angebrachten Refraktions-Korrekturen. Diese Entfernung dürfte damit eine der weltweit längsten der Welt sein, die direkt gemessen wurden. Für die Messungen von Zimmerwald zum Jungfraujoch wurde am Institut für Geodäsie und Photogrammetrie (IGP) eine Hilfsvorrichtung mit Planspiegeln gebaut (H.P. Oesch, 1985), mit deren Hilfe der Strahlengang um 90° abgelenkt wurde. Das Teleskop der Universität Bern kann wegen der fest montierten Kuppel nicht tiefer als 30° Höhenwinkel zielen. Deshalb musste das

Fernrohr in senkrechter Stellung arbeiten und der Strahl umgelenkt werden. Die zur Zeit laufenden Auswertungen dürften interessante Hinweise zur Genauigkeit der terrestrischen Messungen liefern, besteht doch die Möglichkeit des direkten Vergleiches mit den Auswertungen der Satellitenverfahren (Laserdistanz- und GPS-Messungen).

10. Schlussbemerkungen und Danksagung

Das Vorhaben, auf Monte Generoso Laserdistanzmessungen mit dem neuen, vorher im Gelände noch unerprobten MTLRS-2-Teleskop durchzuführen, kann als erfolgreich bezeichnet werden. Dank dem gleichzeitigen Beobachten auf 5 weiteren Feststationen in Europa konnte ein gut konfiguriertes Netz von sehr genauen Basislinien vermessen werden. Die Auswertungen der umfangreichen Daten sind derzeit noch im Gange und werden zu gegebener Zeit veröffentlicht. Mit diesem Aufsatz sollte zunächst eine Orientierung über die durchgeführten Messungen gegeben werden.

Im Rahmen eines gleichzeitig durchgeführten GPS-Projektes wurden die drei Stationen Zimmerwald–Jungfraujoch–Monte Generoso mit verschiedenen GPS-Satellitenempfängern besetzt (Abb. 9), um die gegenseitige Lage auch mit Radiowellen-Methoden zu bestimmen (Geiger, Kahle, 1985). Über die Resultate der einzelnen Kampagnen und die interessanten Systemvergleiche werden wir zu einem späteren Zeitpunkt berichten.

Mit den satellitengestützten Vermessungsarbeiten wurden in der Schweiz erstmals Grundlagen geschaffen, um mittels späterer Wiederholungsmessungen quantitative Aussagen über das tektonische Verhalten der Erdkruste im Alpenraum zu gewinnen.

Wir möchten an dieser Stelle allen Projekt-Mitarbeitern herzlich danken. Dieser Dank richtet sich insbesondere an die Messoprateure, die oft die ganze Nacht durcharbeitet mussten. Es sind dies von holländischer Seite die Herren Niek Rodenburg, Dave Samson und Klaus Otten sowie ferner Danny van Loon, Erik Vermaat, B. van Gelder und Joop Bodde von der TU Delft. In vielen vorbereitenden Besprechungen und Felderkundungen haben zudem Prof. L. Aardoom (Delft) und Dr. P. Wilson (IfAG, Frankfurt a.M.) sowie Prof. St. Müller (ETH, Geophysik) wesentlich an der Realisierung des Projektes mitgewirkt. Speziell möchten wir auch den Herren Dr. W. Gurtner und Th. Schildknecht vom AI für ihre nächtelangen Einsätze auf der Station Zimmerwald danken. Ohne ihren Beitrag wären die Verbindungsmessungen vom Monte Generoso über die Alpen ins Mittelland nicht möglich gewesen. Unser Dank gilt auch der Direktion und den Angestellten der PTT und der Monte Generoso Bahn, die uns nicht nur die Beobachtungsterrasse

unentgeltlich zur Verfügung stellten, sondern auch viele Spezialwünsche bezüglich Transport oder Gebrauch von Werkzeugen stets hilfsbereit erfüllt haben. Das Projekt wurde von der ETH Zürich, der TU Delft und der Schweizerischen Geodätischen Kommission der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft SNG finanziert.

Literatur

Abkürzungen

CDP = Crustal Dynamics Project

CSTG = Int. Coordination of Space Techniques for Geodesy & Geodynamics. IAG Comm. VIII. (Prof. Ch. Reigber, München).

Coates, R.J., 1984: CDP: Status and Plans. Annales Geophysicae, 2: 225-226.

Coates, R.J., 1984: Highly Mobile Laser Ranging Facilities of the CDP. Annales Geophysicae, 2: 259-263.

Cohen, St.C. & D.E. Smith, 1985: LAGEOS, Scientific Results: Introduction. Reprint from Journal of Geophysical Research, Vol. 90, No. B11, September 1985. Published by the American Geophysical Union.

Geiger, A. & H.-G. Kahle, 1985: Wegener-Medias-Project (WMP): SLR-Measurements Monte Generoso-LAGEOS. GPS-Measurements Monte Generoso-Jungfraujoch-Zimmerwald. Short note presented at the first WMP-Workshop, DGFI Munich, December 1985.

Lowman, P.D., 1980: Global Tectonic and volcanic activity of the last one million years. Goddard Space Flight Centre, September 1980. Physiography from «The Physical World», 1975, National Geographic.

Müller, St., H.-G. Kahle, P. Wilson, 1985: NASA CDP. Evolution, Structure and Dynamics of the

Mediterranean-Alpine Region. Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich, Separata Nr. 95.

Vermaat, E. & P. Wilson, 1984: MTLRS 1 & 2. CSTG Bulletin No. 7: 197-212.

Visser, H. & E. Vermaat, 1985: Description of a transportable Satellite Ranging System. Technisch Physischer Dienst tno-th, Bericht Nr. A 8289, Januar 1985.

Wilson, P. & L. Aardoom, 1984: Satellite Laser Ranging to measure crustal motion in the E-Mediterranean. CSTG Bulletin No. 7: 227-234.

Adressen der Verfasser:

Dipl. Ing. B. Bürki, Prof. Dr. H.-G. Kahle, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie ETH-Hönggerberg, CH-8093 Zürich

Ir. E. Vermaat, Dipl. Ing. D. Van Loon, Dept. of Geodesy, Observatory for Satellite Geodesy, Delft University of Technology P.O. Box 581, NL-7300 AN Apeldoorn

Möglichkeiten und Grenzen rechnerunterstützter Feldarbeit

H. Aeschlimann

Tragbare, batteriegetriebene Computer mit Bildschirm weisen heute eine sehr hohe Rechen- und Speicherkapazität auf. Als elektronische Feldbücher verwenden sie das klassische Feldbuch und bieten außerdem die Möglichkeit, beinahe alle erdenklichen Prüfungen und Auswertungen des Datenterminals auf der Instrumentenstation vorzunehmen.

Ein neuartiger Datenterminal am Theodolit und im Blickfeld des Operateurs erlaubt den Verkehr mit dem Computer vom Theodolit aus. Der Datenterminal besteht aus einem kleinen Bildschirm und einer Tastatur, die dem Operateur die Aufbereitung der Information einer Zielung erlaubt. Der Computer kann feldtüchtig in einem Koffer versorgt werden, steht aber jederzeit zur Verfügung.

Les ordinateurs portatifs avec écran présentent un pouvoir de calcul et une capacité de mémoire très élevés. En les utilisant comme carnets de terrain électroniques, ces ordinateurs remplacent les carnets de terrain classiques et en outre ils offrent la possibilité d'effectuer sur place presque toutes les vérifications et calculs. Un terminal de données récemment développé permet la communication entre l'ordinateur et le théodolite. Le terminal est monté sur le théodolite en face de l'opérateur. Il comprend un petit écran et un clavier qui permettent à l'opérateur la préparation de l'information complète d'un pointage. L'ordinateur peut donc être protégé par un coffret tout en restant disponible dans les cas nécessaires.

1. Vermessungstechnische Feldarbeit

Vermessungswerke beruhen auf Messungen, die entweder an Bildern des zu vermessenden Objektes oder am Objekt selber erhoben werden. Soll ein Stück der Erdoberfläche vermessen werden und können dafür keine Bilder herangezogen werden, so ist Feldarbeit zu leisten. Die Feldarbeit liefert die geometrische Information des Vermessungswerkes, vorläufig bezogen auf die Stationen der Vermessungsinstrumente.

Lange Zeit war das Feldbuch der Informationspeicher schlechthin. Wie hoch seine

Vorzüge einzustufen sind, wird erst klar, wenn es durch andere Mittel ersetzt werden soll. Das Feldbuch hat eigentlich nur einen Nachteil, es ist nicht computerkompatibel. Dieser Nachteil ist allerdings derart schwerwiegend, dass es als Speichermedium vermessungstechnischer Information grundsätzlich ausgedient hat. In dessen dienen seine Vorzüge fortan als Richtschnur für allfälligen Ersatz.

Die Entwicklung der Computer erlaubt heute, die Vorzüge des Feldbuches dank einem im Feld verfügbaren Bildschirm weitgehend zu bewahren und überdies ganz neue Perspektiven zu eröffnen. In einem

Punkt ist das Feldbuch den verfügbaren Computern immer noch überlegen: im Feldbuch kann nämlich mühelos durch Skizzen gewisse Information auch grafisch gespeichert werden.

2. Computer als Teil der Feldausrüstung

2.1. Voraussetzungen

Die im Feld verwendeten Computer müssen folgende Eigenschaften aufweisen:

Speicher minimal

256 KByte Hauptspeicher

256 KByte RAM disc oder eingebaute Diskette

Bildschirm

16 – 25 Zeilen zu je 80 Zeichen

Batteriebetrieb bei 10°

10 Stunden

Batteriebetriebener Massenspeicher, intern oder extern

Disketten 5 1/4 " oder 3 1/2 "

eventuell batteriebetriebener Drucker

Da der Bildschirm eine Feldbuchseite zeigen soll, so sind 80 Zeichen je Zeile in jedem Fall zu fordern. Die Zeilenzahl begrenzt die Brauchbarkeit kaum, sofern ein gewisses Minimum überschritten wird.

Der Massenspeicher dient nicht nur zum Speichern und Sichern von vermessungstechnischer Information, sondern vielmehr zum Laden verschiedener Programme und der Aktualisierung der benutzten Software durch neue oder verbesserte Programme.

2.2. Absicht

Von Computern auf der Instrumentenstation verspricht man sich verschiedenes.

- Ersatz des Feldbuches bei voller Wahrgung seiner Übersichtlichkeit
- Weitgehender Ersatz des Sekretärs