

Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 85 (1993)
Heft: 9

Artikel: Mesures de déformation géodésiques et photogrammétriques pour la surveillance des ouvrages de retenue = Geodätische und photogrammetrische Deformationsmessungen für die Überwachung der Stauanlagen
Autor: Aeschlimann, Heinz / Ammann, Eduard / Biedermann, Rudolf
Anhang: Annexes = Anhänge : 1-4
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-939996>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 17.05.2025

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

crit à la fin du paragraphe 6.8: on compare la «précision interne» obtenue pour chaque époque séparément sur la base des mesures, à la «précision externe» résultant de l'ajustage global et simultané de toutes les époques (sur la base des erreurs résiduelles des coordonnées). Lors de cette comparaison, un test statistique global permet d'abord de décider si oui ou non il faut accepter l'hypothèse de déformations «quelque part et dans l'une ou l'autre époque». Si oui, un processus itératif permet dans une deuxième étape de localiser les déformations, à commencer par les plus significatives.

Toutes ces méthodes sont déjà pratiquées avec succès par certains instituts-pilotes ou administrations, en Suisse, en Allemagne, au Brésil ou ailleurs. L'avenir dira lesquelles constituent finalement le compromis économique et technique le plus intéressant.

reihen von Einflussgrößen in die geodätischen Berechnungen von Deformationsmodellen einzubinden (Bild 6.3), [27].

In der Praxis prüft man in der Regel das *Verhalten eines Bauwerkes über längere Zeit*. Veränderungen können so über einige Jahre hinweg verfolgt werden. Die Unsicherheiten bezüglich der «Stabilität» der als fest angenommenen Festpunkte, ihre mögliche Verschiebung, aber auch die laufende Veränderung der Netzkonfiguration und Messanordnung (Sichtbarkeit von Punkten: verdeckt oder neu geschaffen) sowie die sich laufend verbessernde Genauigkeit von Messinstrumenten (und allgemein die verbesserten Technologien, welche in der Vermessung zur Anwendung kommen), all das erschwert eine solche Analyse. Solch komplexe Systeme lassen sich dank einer *multivariaten Analyse* lösen. Vereinfacht kann man sagen, dass das Prinzip dabei dem am Schluss von Paragraph 6.8 beschriebenen Vorgehen gleicht: Die «innere Genauigkeit» jeder einzelnen Messepoche wird mit der «äusseren Genauigkeit» (berechnet aus der Gesamtheit der Messungen aller Messepochen) auf der Basis der verbleibenden Widersprüche der einzelnen Koordinaten verglichen. Bei diesem Vergleich von innerer und äusserer Genauigkeit erlaubt ein globaler statistischer Test vorab eine Aussage darüber, ob die Hypothese einer Verschiebung der Punkte «an eine beliebige Stelle im Netz und während irgendeiner Messepoche» angenommen werden muss oder nicht. Lautet die Antwort «Ja», so werden in einem zweiten Schritt iterativ die Verformungen, beginnend mit den signifikantesten, eruiert.

Die hier beschriebenen Methoden sind bereits mit grossem Erfolg bei verschiedenen Pilotprojekten an Hochschulen und diversen Institutionen eingesetzt worden, in der Schweiz, in Deutschland, in Brasilien usw. Die Zukunft wird zeigen, welche Methode sich schliesslich bezüglich des Kompromisses von Wirtschaftlichkeit und Technologie durchsetzen kann.

Annexe n° 1

1. Mesures automatiques

Dr Heinz Aeschlimann

1.1 Les mesures comme base de la surveillance

La surveillance des barrages et de leurs alentours sert, en fin de compte, à distinguer entre comportement normal et comportement exceptionnel. La détection précoce et fiable d'un comportement exceptionnel est essentielle pour l'analyse de l'état d'un ouvrage.

Les barrages, comme le terrain, ne sont pas surveillés intégralement, mais par l'intermédiaire d'un système réduit de points choisis à cet effet. La surveillance est constituée par les mesures géodésiques entre les points de cet ensemble et par la mesure ponctuelle de grandeurs physiques. La seule méthode autorisant la mesure intégrale de grandeurs géodésiques est la photogrammétrie, mais pour des raisons de précision, elle reste limitée à des cas particuliers.

L'ensemble de l'information sur le comportement des points du système réduit est contenu dans les séries enregistrées des différentes grandeurs observées. Du point de vue mathématique, ces observations constituent des séries temporelles. L'interprétation des résultats calculés sur la base de ces séries temporelles suppose que l'on

Anhang Nr. 1

1. Automatische Messungen

Heinz Aeschlimann

1.1 Messungen als Grundlage von Überwachungen

Die Überwachung von Talsperren und ihrer Umgebung dient letzten Endes der Unterscheidung des Normalverhaltens vom ausserordentlichen Verhalten. Sicheres und frühzeitiges Erkennen eines ausserordentlichen Verhaltens ist für die Beurteilung des Zustandes eines Objektes wesentlich.

Sowohl die Talsperren als auch das Gelände werden nicht integral, sondern durch ein in Einzelpunkte aufgelöstes Ersatzsystem erfasst. Die Überwachung stützt sich sowohl auf geodätische Messungen zwischen den Punkten des Ersatzsystems als auch auf die punktuelle Messung von physikalischen Grössen. Als einzige Messmethode für geodätische Grössen erlaubt die Photogrammetrie eine integrale Erfassung, allerdings wegen der Genauigkeit beschränkt auf Spezialfälle.

Die gesamte Information über das Verhalten des Ersatzsystems ist in den Messreihen der verschiedenen Messgrössen enthalten. Sie stellen im mathematischen Sinn Zeitreihen dar. Die Interpretation der aus den Zeitreihen für das Ersatzsystem berechneten Resultate setzt

puisse interpoler entre les points du système réduit et entre les valeurs observées des séries temporelles.

L'exploitation des observations géodésiques diffère dans le détail de celle des séries temporelles. Les observations géodésiques ne sont ni commodes, ni parlantes pour l'analyse du comportement des points du système réduit. C'est pourquoi elles sont transformées en coordonnées avant l'analyse, une opération qui malgré l'aide de l'informatique ne s'est pas encore débarrassée de toutes les craintes qu'elle suscite. Une partie de ces craintes provient du fait que les observations ne se succèdent pas assez rapidement dans le temps, ce qui oblige souvent à faire des hypothèses sur l'origine des tiraillements.

La surveillance d'ouvrages ne s'appuie pas que sur les observations, mais aussi sur une analyse très personnelle basée sur l'opinion des experts. Ce jugement n'est pas quantifiable comme une observation, mais il constitue néanmoins un avis important sur la stabilité ou l'évolution de paramètres qui ne sont pas mesurables techniquement. L'expertise conduit souvent à une extension du dispositif de mesure, permettant de quantifier et d'objectiver les phénomènes qui ont justifié cette extension. De cas en cas, on choisit et réglemente la fréquence des observations.

1.2 Mesures automatiques et mesures manuelles

La saisie automatique de grandeurs physiques et chimiques assistée par ordinateur fait aujourd'hui partie de la routine de n'importe quel laboratoire. Pour ce faire, le commerce propose un immense choix de capteurs.

Des grandeurs géométriques telles que des inclinaisons, des élongations, des distances, intégrées dans un dispositif de mesure bien conçu, donnent une bonne image des déplacements par rapport à une situation de départ [31]. Là encore, les capteurs nécessaires sont disponibles sur le marché. Les grandeurs géométriques servent souvent d'intermédiaire pour d'autres grandeurs non directement observables; par exemple, on calcule souvent des contraintes à partir d'élongations observées.

Les méthodes optiques automatiques sur de longues distances sont toujours assez difficiles, à cause de la difficulté à réaliser des pointés automatiques. C'est particulièrement vrai pour toutes les méthodes géodésiques.

Pour les grandeurs géodésiques de type «direction horizontale» et «angle vertical», en l'absence d'instruments capables de respecter un critère précis de pointé, il a fallu attendre jusqu'en 1990 pour disposer de solutions. Celles-ci utilisent le plus souvent un rayon de visée actif – un laser dans l'instrument de mesure ou un émetteur situé au point visé – et un traitement d'image [3], [28], [29], [6].

Depuis la même époque, on trouve sur le marché des niveaux capables de lire sans émetteur actif une mire passive, grâce à un traitement d'image (NA 2000 et NA 3000 de Leica). Ils sont incapables de chercher un objet à viser, mais par contre le traitement d'image autorise toujours une connexion directe sur un ordinateur. De même, un distancemètre est incapable en soi de chercher une cible, mais en tant qu'appareil entièrement électronique, il est, comme aussi tout récepteur GPS, totalement compatible avec la technique informatique. En outre, pour les récepteurs GPS, le pointé vers une cible n'est pas nécessaire, et le besoin d'une reconnaissance locale des cibles disparaît.

Pour autant que ce soit techniquement possible, l'introduction de procédés de mesure automatisés vise toujours

voraus, dass zwischen den Punkten des Ersatzsystems und zwischen den Messwerten der Zeitreihen interpoliert werden kann.

Die Auswertung der geodätischen Messwerte weicht von der Behandlung von Zeitreihen in Einzelheiten ab. Geodätische Messwerte sind zur Beurteilung des Verhaltens der Punkte des Ersatzsystems unbequem und unübersichtlich. Die Messwerte werden deshalb vor weiteren Analysen zu Koordinaten umgeformt, ein Unterfangen, das trotz Computer immer noch nicht allen Schrecken verloren hat. Ein Teil des Schreckens rührt davon her, dass die Messwerte in der Zeitreihe zu wenig dicht aufeinanderfolgen. Über die Ursachen der Fehlereinflüsse muss deshalb oft spekuliert werden.

Die Überwachung von Objekten stützt sich nicht nur auf Messungen, sondern ebenso sehr auf ein persönliches, auf Anschauung beruhendes Urteil von Experten. Dieses Urteil ist nicht in Einheiten messbar wie ein Messwert, wohl aber ist es ein wichtiger Hinweis auf die Konstanz oder die Veränderung von messtechnisch nicht erfassten Parametern. Das Urteil führt oft zu einer Erweiterung des Messsystems, womit die Ursachen, die dazu geführt haben, numeriert und objektiviert werden.

Die Häufigkeit der Erhebung von Messwerten wird fallweise entschieden und reglementiert.

1.2 Automatische Messungen und Handmessungen

Die automatische, computergesteuerte Erfassung von physikalischen und chemischen Messgrößen gehört in jedem Labor zum Alltag. Die hierfür erforderlichen Sensoren sind in grosser Vielfalt auf dem Markt.

Geometrische Größen, wie Neigungen, Dehnungen, Abstände usw., geben bei geschickter Anlage des Messsystems ein gutes Bild über Bewegungen relativ zu einer Ausgangslage [31]. Die Sensoren sind ebenfalls marktüblich. Geometrische Größen dienen oft zur mittelbaren Messung von nicht direkt messbaren Größen, z.B. werden Spannungen aus gemessenen Dehnungen berechnet.

Automatische optische Messverfahren zur Überbrückung grösserer Distanzen sind immer aufwendig. Der Grund liegt in den Schwierigkeiten, automatisch zu zielen. Davon sind insbesondere alle geodätischen Messverfahren betroffen.

Für die beiden geodätischen Messgrößen Horizontalrichtung und Vertikalwinkel sind wegen des Fehlens eines gerätetechnisch einfach zu realisierenden Zielkriteriums erst um 1990 Lösungen präsentiert worden. Sie beruhen zumeist auf einem aktiven Zielstrahl – einem Laser im Messgerät oder einem Sender im Zielpunkt – und auf Bildverarbeitung. Um die gleiche Zeit erschienen Nivellierinstrumente auf dem Markt, die ohne aktive Sender mit Hilfe der Bildverarbeitung [3], [28], [29], [6] eine passive Skala ablesen können (NI 2000 und NI 3000 von Leica). Ein Ziel können sie allerdings nicht suchen, die Bildverarbeitung ermöglicht hingegen immer einen direkten Anschluss an einen Computer. Auch ein Distanzmesser kann ein Ziel nicht selbstständig suchen, er ist jedoch als vollelektronisches Gerät ebenso wie ein GPS-Empfänger seit dem Erscheinen computerkompatibel. Bei GPS-Empfängern ist zudem jede Ausrichtung auf ein Ziel unnötig, womit auch jede örtliche Erkennung eines Zieles dahinfällt.

Vorausgesetzt, es sei technisch möglich, werden automatische Messverfahren im Prinzip immer zur Verbesserung eines schlechten Kosten/Nutzen-Verhältnisses von Handmessungen eingesetzt. Anders ausgedrückt sind es

à améliorer le mauvais rapport coût/rendement d'observations manuelles. En d'autres termes, on y trouve deux avantages principaux: d'une part des séries temporelles beaucoup plus denses, et d'autre part l'intégration de la saisie et de l'exploitation des valeurs observées dans un système d'information ou dans un système-expert. Pris en détail, les besoins suivants parlent en faveur des observations automatisées:

- Accès permanent aux valeurs mesurées et aux calculs standards. Dans le réseau de communication général de l'entreprise, l'état mesuré le plus récent est toujours disponible sous la forme d'un graphique à l'écran, de tableaux, etc. [30].
- Documentation détaillée du comportement normal. Caractérisation du comportement normal à l'aide d'une analyse numérique plutôt que d'un examen visuel du diagramme des mesures en fonction du temps.
- Maîtrise technique des mesures lors de situations exceptionnelles. La connaissance du comportement normal permet de tester toute nouvelle situation, sans perte de temps – voire automatiquement – par rapport à l'hypothèse d'un comportement déviant.
- Documentation de changements à court terme ou de nouveaux phénomènes locaux. Saisie des paramètres qui en sont probablement responsables. Le coût d'observations manuelles peut être prohibitif.
- Surveillances en phase de révision ou de transformations difficiles, ou documentation de phénomènes locaux. Suivi et documentation de comportements normaux ou exceptionnels, avant, pendant et après cette phase.
- Mise en évidence de l'influence de paramètres inconnus sur les grandeurs observées, par l'analyse de séries temporelles.
- Surveillance de zones de terrain ou de rocher menacées d'éboulement. But primaire: documentation du comportement normal en fonction des intempéries, du cycle journalier et saisonnier, etc. But secondaire: actualisation permanente du pronostic sur l'évolution probable de la situation [4].

Un dispositif de mesure automatique peut être en tout temps complété par la pose de capteurs supplémentaires. L'exploitation du matériel d'observation selon de nouveaux critères peut exiger la création de nouvelles fonctions logicielles.

Les problématiques ainsi décrites illustrent bien, outre les avantages des mesures automatisées, l'évolution de l'importance des composantes isolées d'un dispositif de mesure. Autrefois, ce sont les capteurs eux-mêmes qui concentraient l'intérêt; aujourd'hui, c'est leur connexion en réseau et la gestion du système. Des possibilités d'adaptation à de nouveaux besoins doivent évidemment être prévues.

1.3 Structure des systèmes de mesure automatiques

Les systèmes de mesure automatiques peuvent être décomposés en quatre secteurs (figure 1):

- capteurs et actionneurs
- système informatique et logiciels
- télécommunication
- alimentation électrique

Ces quatre secteurs correspondent aussi aux quatre principaux groupes de problèmes à résoudre. L'état de la technique permet, dans une large mesure, de les traiter séparément. C'est particulièrement vrai pour les capteurs et les actionneurs, et pour la télécommunication.

folgende zwei Hauptgründe: einerseits dichtere Zeitreihen, andererseits die Integration von Erfassung und Auswertung der Messwerte in ein Informations- oder Expertensystem. Im einzelnen sprechen folgende Wünsche zugunsten von automatischen Messungen:

- Ständige Verfügbarkeit von aktuellen Messwerten und Standardauswertungen. Im gesamten Kommunikationsnetz des Werkes steht der aktuelle Stand in Form von Bildschirmgrafik, Tabellen usw. zur Verfügung [30].
- Detaillierte Dokumentation des Normalverhaltens. Beurteilung des Normalverhaltens anhand einer numerischen Datenanalyse anstelle einer visuellen Beurteilung der Messwert-Zeit-Diagramme [30].
- Messtechnische Beherrschung von Ausnahmesituationen. Die Kenntnis des Normalverhaltens erlaubt, jede neue Situation ohne Zeitverlust – gegebenenfalls automatisch – auf Verträglichkeit mit der Hypothese einer Abweichung zu prüfen.
- Dokumentieren kurzfristiger Änderungen oder neuer lokaler Phänomene. Erfassen der vermutlich dafür verantwortlichen Parameter. Der Aufwand für Handmessungen kann prohibitiv sein.
- Überwachen heikler Revisions- oder Umbauphasen oder zur Dokumentation von lokal auftretenden Phänomenen. Verfolgung und Dokumentation des normalen und ausserordentlichen Verhaltens vor, während und nach dieser Phase.
- Aufdecken der Einflüsse von unbekannten Parametern auf die Messgrößen durch Zeitreihenanalyse.
- Überwachung von absturzgefährdeten Fels- und Geländezonen. Primäres Ziel: Dokumentation des Normalverhaltens in Funktion der Witterung, der Tages- und der Jahreszeit usw. Sekundäres Ziel: kontinuierlich aktualisierte numerische Prognose des mutmasslichen weiteren Ablaufes [4].

Eine bestehende automatische Messanlage lässt sich jederzeit durch Anschliessen neuer Sensoren erweitern. Die Überarbeitung des vorhandenen Beobachtungsmaterials nach neuen Kriterien erfordert eventuell gewisse neue Software-Funktionen.

Die aufgeführten Problemkreise verdeutlichen neben der Zweckmässigkeit automatischer Messungen auch die Wandlung der Bedeutung der einzelnen Komponenten eines Messsystems. Standen früher eindeutig die Sensoren im Zentrum des Interesses, so ist es heute die Vernetzung aller Sensoren und die Steuerung des Messsystems. Die Möglichkeit zu Anpassungen an neue Bedürfnisse wird beinahe schon als selbstverständlich vorausgesetzt.

1.3 Struktur von automatischen Messsystemen

Automatische Messsysteme lassen sich in vier Bereiche gliedern (Bild 1).

- Sensoren und Aktoren
- Computersystem mit Software
- Telekommunikation
- Energieversorgung

Diese vier Bereiche sind gleichzeitig auch die vier wesentlichen Problemkreise. Der Stand der Technik erlaubt eine weitgehend unabhängige Behandlung jedes Bereiches. Dies trifft insbesondere auch für die Sensorik und Aktorik sowie für die Telekommunikation zu [5].

1.3.1 Sensoren und Aktoren

Sensoren liefern die Ausgangsinformation in Form von Messwerten. Ihre Gewinnung wird softwaremässig ge-

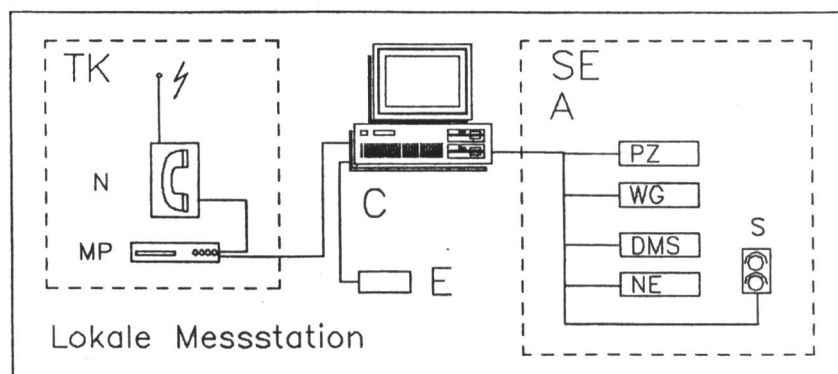
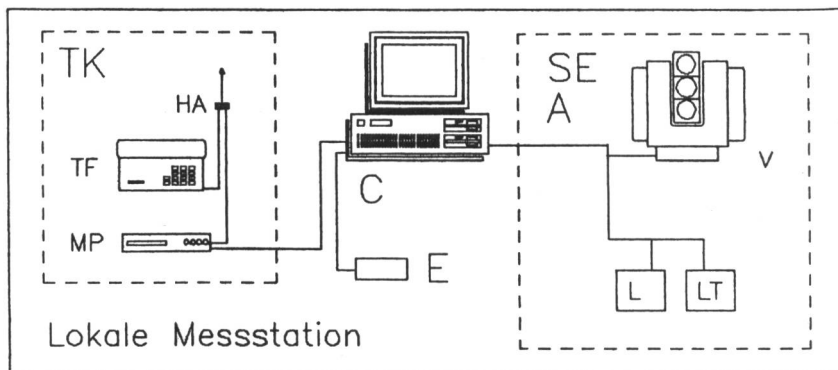
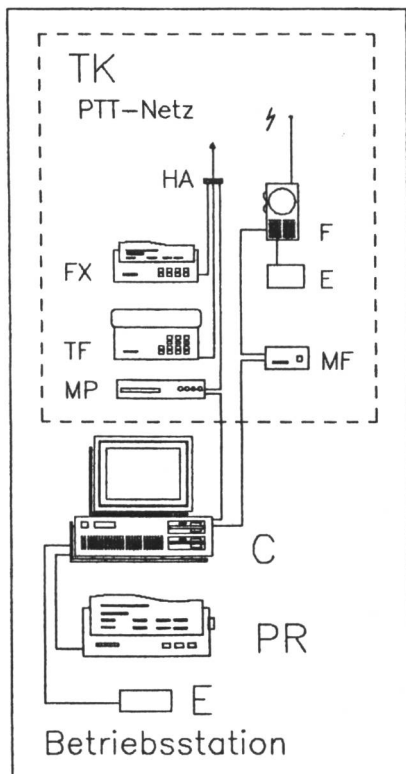


Figure 1

SE, A Capteurs, actionneurs [31]

Acquisition de l'information-output sur les grandeurs physiques et géométriques nécessaires; transfert analogique ou numérique par un système-bus.

V Instruments de mesure géodésiques

L Laser

LT Cibles laser

C Système informatique, logiciel [31]

PC ou Laptop, exploitation du système de mesure, mesure de gradients des valeurs observées, élaboration des résultats, exécution d'opérations telles que le transfert de données ou le pilotage d'installations.

PR Imprimante

TK Télécommunication [31]

Echange de données entre une station d'exploitation et des stations locales d'observation, pilotage à distance des stations locales d'observation.

TF Téléphone

MP Modem pour réseau PTT

F Emetteur-radio

E

FX Fax

Alimentation en énergie

Réseau 220V, énergie solaire, batteries ou groupes électrogènes de secours.

WG

Capteurs de déplacement

DMS

Jauges de dilatation

NE

Capteurs d'inclinaison

S

Avertisseurs

MF

Modem pour émetteur-radio

N

Natel

HA

Raccordement au réseau PTT

Bild 1.

SE, A Sensoren, Aktoren [31]

Gewinnung der Ausgangsinformation über die erforderlichen physikalischen und geometrischen Grössen, Übermittlung der Messwerte analog oder digital über ein Bus-System.

V digitale Vermessungsinstrumente

L Laser

LT Laser-Targets

PZ Piezometer

C Computersystem, Software [31]

PC oder Laptop, Betrieb des Messsystems, Messung von Gradienten der Messwerte, Aufbereitung von Resultaten, Ausführen von Aktionen, z.B. Datenübermittlung, Steuern von Anlagen.

PR Printer

TK Telekommunikation [31]

Datenverkehr zwischen einer Betriebsstation und den lokalen Messstationen, Fernsteuerung der lokalen Messstationen.

TF Telefon

MP Modem für PTT-Netz

F Funkgerät

FX Fax

E Energieversorgung

220-V-Netz, Solarenergie, Batterien oder Notstromgruppen.

WG Weg-Geber

DMS Dehnmessstreifen

NE Neigungsmesser

S Signalanlagen

1.3.1 Capteurs et actionneurs

Les capteurs fournissent l'information initiale sous la forme de valeurs mesurées. Leur acquisition est gérée par un logiciel. Selon le type de capteur, une mesure numérique est transmise à l'ordinateur par un système de bus, ou bien c'est le logiciel qui connecte un capteur donné au convertisseur analogique-digital de l'ordinateur grâce à un multiplexeur. La tendance s'oriente nettement vers les systèmes de bus. Ils offrent l'avantage que le câblage des

steuert. Je nach Typ des Sensors wird ein digitaler Messwert über ein Bus-System zum Computer übermittelt, oder die Software schliesst über einen Multiplexer einen bestimmten Sensor an den Analog-Digital-Wandler im Computer an. Die Entwicklung geht deutlich in die Richtung von Bus-Systemen. Sie haben den Vorteil, dass die Verkabelung der einzelnen Sensoren sehr einfach ist. Ein einziges Kabel führt von der Schnittstelle des Computers zum ersten Sensor, von diesem zum nächsten usw. Jeder Sensor verfügt über eine Adresse, über die der Computer

capteurs individuels est très simple. Un seul câble relie l'interface de l'ordinateur au premier capteur, de celui-ci au suivant, etc. Chaque capteur dispose d'une adresse qui lui permet de dialoguer avec l'ordinateur. La technique analogique exige un câblage séparé de chaque capteur avec le multiplexeur.

Les actionneurs sont des éléments pilotés par un logiciel et exécutant certaines actions, tels que signaux, ventilateurs, pompes, etc.

1.3.2 Système informatique et logiciels

Les possibilités de calcul et de mémoire des PC permettent aujourd'hui d'exploiter un dispositif de mesure comptant plusieurs centaines de capteurs. La difficulté principale lors du choix d'un ordinateur était autrefois constituée par les problèmes de compatibilité; elle s'est peu à peu déplacée sur le choix des équipements numériques associés. Le système-bus et la télécommunication sont un aspect très important.

Il serait faux de sous-estimer la sécurité de fonctionnement de l'installation de mesure. On ne pense pas d'abord ici aux perturbations provoquées par des champs électromagnétiques – qu'on peut éviter par les précautions habituelles – mais aux pannes d'ordinateur. A la place d'un seul ordinateur coûteux, on installera avec beaucoup plus d'efficacité un système redondant composé de deux ou trois PC normaux connectés en réseau. Ainsi conçu, le système restera avec une très haute probabilité apte en permanence à la télécommunication. En cas de panne de l'un des ordinateurs, l'autre peut l'annoncer à la centrale d'exploitation. La défection de capteurs isolés n'a pas d'influence sur le reste du système.

Le logiciel est en mesure de constater des variations très rapides. Par l'observation simultanée à intervalles de temps pré-définis (mode conventionnel) et selon les gradients (dépassement d'une différence donnée entre deux valeurs observées dans un laps de temps défini), le volume des valeurs mémorisées n'augmente pas excessivement, même lorsqu'on saisit des variations rapides. Toutes les fonctions de mesure, de mémorisation et de calcul sont regroupées dans un cycle de mesure.

Les fonctions du logiciel vont de la production de graphiques sur simple pression d'un bouton jusqu'aux analyses périodiques des mesures les plus complexes. Au vu des résultats de ces analyses, des actionneurs peuvent être enclenchés automatiquement. L'analyse des données se fait soit on-line à la station de mesure, soit en traitement différé. La télécommunication vers un réseau d'échange de données est une fonction importante du logiciel.

1.3.3 Télécommunication et alimentation

Un dispositif de mesure communique avec le monde extérieur par l'intermédiaire d'accessoires tels que modem, fax-modem (en plus des fonctions modem habituelles pour l'envoi d'informations sur le fax du destinataire), Natel et radio-émetteurs. On pense d'abord à l'échange de données via le réseau PTT. Les modems et les fax-modems nécessitent un module de logiciel disponible sur le marché. La télécommunication fonctionne dans les deux sens et n'est pas limitée à l'échange de données; elle permet de modifier certains paramètres des logiciels d'exploitation, voire même d'échanger des parties entières de logiciel. Ainsi, le logiciel n'est pas seulement pilotable à distance, mais aussi modifiable à distance. L'alimentation en énergie, à proximité des barrages, ne pose aucun problème.

mit ihm verkehrt. Die Analog-Messtechnik erfordert eine separate Verkabelung jedes Sensors bis zum Multiplexer.

Aktoren sind softwaremässig gesteuerte Elemente, die bestimmte Aktionen ausführen können. Darunter fallen Signalanlagen, Ventile, Pumpen usw.

1.3.2 Computersystem mit Software

Die Rechen- und Speicherkapazität von PCs reicht heute für die Bewirtschaftung eines Messsystems mit mehreren hundert Sensoren aus. War früher wegen Kompatibilitätsfragen die Evaluation eines Computers von zentraler Bedeutung, so hat sich die Aktivität allmählich auf die Auswahl der übrigen Digital-Ausrüstung des Messsystems verlagert. Vor allem das Bus-System und die Telekommunikation sind wesentlich.

Nicht zu unterschätzen ist die Betriebssicherheit der Messanlage. Dabei stehen nicht so sehr die Störungen wegen elektromagnetischer Felder im Vordergrund – sie werden mit gleichen Massnahmen wie bis anhin zu beherrschen versucht –, sondern die Ausfallrate der Computer. Anstatt einen einzigen, teuren und schlecht zu wartenden Industrie-Computer einzusetzen, wird mit viel mehr Effizienz ein redundantes System aus zwei oder drei untereinander vernetzten normalen PC installiert. Damit bleibt das System über Telekommunikation mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit ständig ansprechbar. Bei Ausfall eines Computers erstattet der überlebende Computer eine entsprechende Meldung an die Betriebszentrale. Der Ausfall einzelner Sensoren hat keinen Einfluss auf das übrige Messsystem.

Die Software ist in der Lage, kurzfristige Veränderungen festzustellen. Durch die gleichzeitige Messung in definierbaren Zeitintervallen (konventionelle Art) und nach Gradienten (Überschreiten einer definierbaren Differenz zwischen Messwerten, die in einem definierbaren Zeitintervall aufeinanderfolgen) steigt die gespeicherte Datenmenge auch bei Erfassung kurzfristiger Änderungen nicht über alle Grenzen. Alle Mess-, Speicher- und Auswertefunktionen sind zu einem Messzyklus zusammengefasst.

Die Funktionen der Software reichen von der Berechnung von Grafiken auf Knopfdruck bis zur periodischen, beliebig komplexen Datenanalyse. Aufgrund der Resultate dieser Analysen können automatisch Aktoren aktiviert werden. Die Datenanalyse kann on-line auf der Messstation oder im post processing erfolgen. Eine wesentliche Funktion der Software ist die Telekommunikation über ein Datenverkehrsnetz.

1.3.3 Telekommunikation und Energieversorgung

Ein Messsystem verkehrt mit der Aussenwelt mit Hilfe von Zusatzgeräten wie Modem, Fax-Modem (neben den üblichen Modem-Funktionen auch zum Versenden von Mitteilungen auf den Fax des Empfängers), Natel oder Funkgeräte. Im Vordergrund steht der Datenverkehr über das PTT-Netz. Die Modems und Fax-Modems erfordern ein besonderes Software-Modul, das auf dem Software-Markt beschafft wird. Die Telekommunikation läuft in beiden Richtungen und ist nicht nur auf den Datenverkehr beschränkt. Es können Software-Parameter zur Steuerung des Messsystems verändert werden, oder es können auch ganze Software-Teile ersetzt werden. Das Messsystem wird dadurch nicht nur fernsteuerbar, sondern auch manipulierbar. Die Energieversorgung von Messsystemen ist in der Nähe von Talsperren kein Problem.

1.4 Concepts

1.4.1 Le rôle des différentes parties d'un dispositif de mesure

On peut décrire ce rôle ainsi:

Les capteurs et les actionneurs fixent le but du dispositif. C'est par leur choix qu'on détermine qualitativement ses possibilités.

Le logiciel intègre les capteurs en un dispositif interdépendant. Il exécute les mesures, les mémorise, les exploite et extrait des résultats les conclusions prévues. Il connecte le système des points de mesure individuels à un système d'information ou à un système-expert. L'ordinateur, aujourd'hui, ne joue plus que le rôle d'un accessoire bon marché et disponible partout.

La télécommunication, qui garantit les échanges entre divers points de mesure et une centrale d'exploitation, peut être installée sans gros problème, si nécessaire. Le matériel se trouve dans le commerce; du point de vue fonctionnel, le logiciel est clairement défini. La télécommunication joue d'une manière générale un rôle tellement important qu'elle ne pose pratiquement plus de problème dans le cas des systèmes automatiques de mesure.

L'alimentation en énergie doit être résolue de cas en cas. Des difficultés peuvent survenir pour des systèmes autonomes. Jusqu'ici, les fabricants de capteurs et d'ordinateurs n'ont pas consacré beaucoup d'efforts à une réduction de la consommation d'énergie.

1.4.2 Capteurs et logiciels

Les capteurs et le logiciel fixent ensemble les possibilités du dispositif. Ils l'emportent en importance sur tout le reste, ordinateur compris. Il ne va pas encore de soi pour tout le monde que dans un dispositif de mesure automatique, le logiciel est en fait encore plus important que les capteurs. Etant donné son rôle capital pour les performances du dispositif, il faut lui accorder une place centrale dès la phase de conception.

Même lorsque le but du dispositif automatique de mesure ne consiste qu'à exécuter et à mémoriser des mesures, la sécurité des données et la nécessité de disposer immédiatement des résultats devrait conduire à inclure l'exploitation dans le logiciel. Cela reste vrai même s'il n'est utilisé que pour le stockage de mesures.

1.4.3 Echange de données entre les capteurs et l'ordinateur

Les réseaux nécessaires à l'échange de données entre les capteurs et l'ordinateur ne doivent pas être confondus avec les réseaux de télécommunication. Les premiers s'appuient depuis longtemps et de plus en plus sur des systèmes-bus disponibles dans le commerce. Dans des environnements électromagnétiques difficiles, ils utilisent même les fibres optiques bien connues en télécommunication. Toutes les composantes nécessaires à cette technique sont disponibles sur le marché des ordinateurs.

1.4.4 Extension d'un système de mesure existant

Lorsqu'un dispositif de mesure existant doit être complété, on peut connecter au système-bus tous les nouveaux capteurs nécessaires sans difficulté. Dans une structure où les extensions sont prévues, il n'est même pas nécessaire de modifier le logiciel.

1.4 Konzepte

1.4.1 Rolle der einzelnen Bereiche eines Messsystems

Sie lässt sich etwa wie folgt umschreiben:

Die Sensoren und Aktoren bestimmen den Zweck des Systems. Durch ihre Wahl werden seine qualitativen Fähigkeiten festgelegt.

Die Software integriert die Sensoren zu einem zusammenhängenden System. Sie löst die Messungen aus, speichert sie, wertet sie aus und zieht aus den Resultaten die vorgesehenen Schlüsse. Sie fasst das System der einzelnen Messstellen zu einem Informations- oder Expertensystem zusammen. Der Computer spielt heute nur noch die Rolle eines billigen und überall zu beschaffenden Zubehörs.

Die Telekommunikation zum Vermitteln des Verkehrs zwischen verschiedenen lokalen Messstationen und einer zentralen Betriebsstation wird bei Bedarf ohne grössere Probleme installiert. Die Hardware ist marktgängig, die Software ist funktional klar definiert. Das Fachgebiet der Telekommunikation spielt allgemein eine derart bedeutende Rolle, dass für automatische Messsysteme kaum neue Probleme auftreten.

Die Energieversorgung wird fallweise gelöst. Schwierigkeiten ergeben sich möglicherweise bei autonomen Messsystemen. Die Hersteller von Sensoren und Computern haben bis anhin nicht viele Gedanken an einen niedrigen Energieverbrauch verschwendet.

1.4.2 Sensoren und Software

Die Bereiche Sensoren und Software bestimmen zusammen die Möglichkeiten des Messsystems. Sie überragen an Bedeutung alle andern Bereiche bei weitem, den Computer eingeschlossen. Nicht Allgemeingut ist die Erkenntnis, dass in einem automatischen Messsystem die Software grundsätzlich wichtiger ist als die Sensoren. Wegen der zentralen Rolle für alle Eigenschaften eines Messsystems muss der Software auch bei der Konzipierung eine zentrale Rolle zukommen.

Wenn auch der Zweck eines automatischen Messsystems vielleicht nur im Sammeln und Speichern von Messwerten besteht, so sollte wegen der Datensicherheit und auch wegen der sofortigen Verfügbarkeit von Resultaten die Auswertung immer in die Software einbezogen werden. Die Software ist dafür konzipiert, auch wenn sie nur zum Speichern von Messwerten verwendet wird.

1.4.3 Datenverkehr zwischen Sensoren und Computer

Die für den Datenverkehr zwischen den Sensoren und dem Computer erforderlichen Netze sind nicht zu verwechseln mit den Telekommunikationsnetzen. Die Datenverbindungen zwischen Sensoren und Computer beruhen heute je länger je mehr auf marktgängigen Bus-Systemen. In elektromagnetisch heikler Umgebung werden für die Datenverbindungen ebenfalls die in der Telekommunikation weit verbreiteten Glasfasern verwendet. Alle dazu erforderlichen Komponenten gehören zum üblichen Computierzubehör.

1.4.4 Erweiterung eines bestehenden Messsystems

Falls das Messsystem erweitert werden soll, so können ohne Schwierigkeiten und mit einfachsten Mitteln die zusätzlich erforderlichen Sensoren am Bus-System angeschlossen werden. Softwaremodifikationen sind wegen

1.5 Les possibilités

1.5.1 Systèmes de mesure fixes ou mobiles

Le plus souvent, les systèmes de mesure sont prévus pour une surveillance de longue durée. C'est pourquoi ils sont installés sans perspective d'un éventuel démontage.

Par contre, la surveillance temporaire de petits objets exige des systèmes faciles à installer et à démonter. L'état de la technique, dans les quatre secteurs décrits sous 1.3, permet de mettre en œuvre sans difficulté des systèmes mobiles comptant 5 à 10 capteurs – y compris des instruments géodésiques digitaux. Leur confort d'utilisation est comparable à celui des instruments géodésiques.

1.5.2 Systèmes de mesure autonomes ou alimentés par le réseau

Les systèmes de mesure autonomes ne disposent pas de télécommunication. C'est pourquoi ils se limitent en général au stockage des données et exigent le renouvellement périodique de leur support de données. Une autonomie d'alimentation, sans connexion à un réseau, est certes possible, mais elle n'est pas bon marché. Les systèmes connectés à un réseau de télécommunication (réseau PTT, y compris Natel, réseau privé, liaison radio) sont accessibles en tout temps. La télécommunication permet le transfert de données, le pilotage à distance de dispositifs de mesure et des installations qui leur sont connectées.

1.5.3 Station de mesure et station d'exploitation

Par télécommunication, une station d'exploitation peut contrôler plusieurs stations automatiques de mesure. Les valeurs observées, ou les résultats intermédiaires calculés aux points de mesure, sont transférés périodiquement et automatiquement vers la station d'exploitation, où ils peuvent être traités en «postprocessing». Au lieu d'un transfert automatique, la station d'exploitation peut aussi récolter «à la demande» des valeurs observées ou – si les cycles d'observation sont répétés à longs intervalles – elle peut exécuter des observations et les transférer. Une station d'exploitation peut être connectée à un nombre quelconque de stations de mesure.

1.5.4 Valeurs-limites et alarmes

Les alarmes s'appuient sur des valeurs-limites pour les valeurs observées. Les valeurs observées sont comparées aux valeurs-limites programmées à chaque cycle de

der ohnehin für Erweiterungen konzipierten Struktur nicht erforderlich.

1.5 Möglichkeiten

1.5.1 Fest installierte und mobile Messsysteme

Messsysteme sind zumeist für eine langfristige Überwachung von Objekten vorgesehen. Sie werden deshalb ohne Rücksichten auf eventuelle Demontage fest installiert. Hingegen erfordert die temporäre Überwachung kleiner Objekte leicht zu installierende und zu demontierende Systeme. Der Stand der Technik in den vier im Abschnitt 1.3 behandelten Problemkreisen gestattet ohne weiteres, dass Systeme mit 5 bis 10 Sensoren – digitale Vermessungsinstrumente eingeschlossen – als mobiles System eingesetzt werden können. Ihre Handhabung ist zu vergleichen mit dem Umgang mit Vermessungsinstrumenten.

1.5.2 Autonome und vernetzte Messsysteme

Autonome Messsysteme verfügen über keine Telekommunikation. Sie können deshalb im wesentlichen nur Daten speichern und erfordern einen periodischen Wechsel des Datenträgers. Energiemässige Autonomie, d. h. ohne Netzanschluss, ist möglich, allerdings ist sie nicht billig. Vernetzte Systeme sind über ein Telekommunikationsnetz (PTT-Netz inkl. Natel, privates Netz, Funkverkehr) jederzeit zugänglich. Die Telekommunikation erlaubt sowohl den Datenverkehr als auch die Fernsteuerung der Messanlage und von eventuell weiteren damit verbundenen Anlagen.

1.5.3 Messstation und Betriebsstation

Mit Hilfe der Telekommunikation können mehrere automatische Messstationen von einer Betriebsstation überwacht werden. Die Messwerte oder die lokal auf der Messstation berechneten Zwischenresultate werden periodisch und automatisch in die Betriebsstation übertragen. Sie können dort im «post processing» beliebig bearbeitet werden. Ebenso wie die automatische Übertragung können von der Betriebsstation aus die Messwerte bei Bedarf abgeholt werden, oder es können – falls die Messzyklen in längeren Zeitabständen wiederholt werden – Messungen ausgelöst und die aktuellen Messwerte übertragen werden. Eine Betriebsstation kann mit beliebig vielen Messstationen verkehren.

1.5.4 Grenzwerte und Alarme

Grenzwerte von Messwerten bilden die Grundlage von Alarmen. Die softwaremässig gesetzten Grenzwerte werden mit jedem Messzyklus geprüft. Bei Überschreitung wird eine ebenfalls softwaremässig vorgesehene Aktion ausgeführt. Diese Aktion kann in einem Alarm einer bestimmten Stufe bestehen.

Das Problem liegt nicht im Auslösen von Alarmen, sondern im Vermeiden von Fehlalarmen. Zwei Arten von Fehlalarmen sind zu unterscheiden. Fehlalarm I (sogenannter Fehler erster Art): Der Alarm ist irrtümlicherweise ausgelöst worden, obwohl das dem Alarm zugrunde gelegte Ereignis nicht eingetroffen ist. Fehlalarm II (sogenannter Fehler zweiter Art): Der Alarm ist irrtümlicherweise nicht

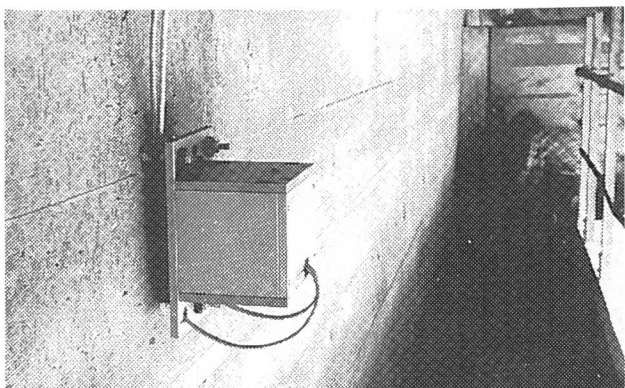


Figure 2. Capteur d'inclinaison bidirectionnel (Nivel20 de Leica) dans son coffre de montage. Les deux compensateurs sont orientés parallèlement et perpendiculairement à l'axe du pont. Les deux câbles du bus RS 485 qui sortent du coffret rejoignent deux Nivel20 voisins. Les câbles permettent le transfert de données et l'alimentation. L'ordinateur est en retrait sur la passerelle.

Bild 2. Zweikomponenten-Neigungsmesser (Nivel 20 von Leica) in Montagegehäuse. Die Komponenten sind senkrecht und parallel zur Brückenachse ausgerichtet. Die vom Montagegehäuse ausgehenden zwei Kabel des RS485-Bus führen zu den zwei benachbarten Nivel 20. Die Kabel enthalten sowohl die Datenleitung als auch die Energieversorgung. Der Computer steht im Hintergrund auf dem Laufsteg.

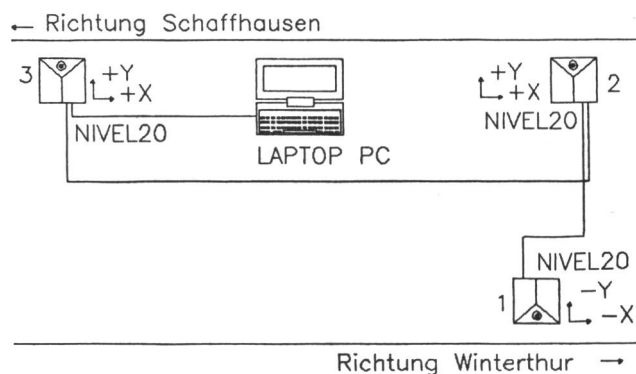


Figure 3. Schéma de mesure. Deux capteurs d'inclinaison ont été montés sur la structure porteuse, à mi-chemin entre un pilier et une butée. Le troisième a été placé à mi-distance des butées. Le système de mesure a été installé et mis en service en 4 heures. Le démontage n'a pris que 2 heures.

mesure. En cas de dépassement, une action prévue par le logiciel est exécutée; cette action peut être le déclenchement d'une alarme.

Le vrai problème n'est pas de déclencher une alarme, mais d'éviter de fausses alertes. On peut distinguer deux types de fausses alertes. La fausse alerte I (aussi appelée erreur de premier type): l'alarme est déclenchée par erreur, bien que l'événement qui devait la déclencher ne se soit pas produit. La fausse alerte II (aussi appelée erreur de 2e type): par erreur l'alarme ne se déclenche pas, bien que l'événement qui devait la déclencher se soit produit. Exemple: soit un bloc de rocher au-dessus d'une voie ferrée. Fausse alerte I: le signal d'alarme passe au rouge, bien que le rocher ne soit pas tombé. Fausse alerte II: le signal d'alarme reste vert, bien que le rocher soit tombé sur la voie.

Bild 3. Schema des Messsystems. Im Querschnitt in der Mitte des Feldes zwischen einem Pfeiler und einem Widerlager wurden zwei Neigungsmesser am Tragwerk montiert. Der dritte wurde in der halben Distanz zwischen der Mitte des Feldes und dem Widerlager angebracht. Das Messsystem wurde in 4 Stunden montiert und in Betrieb genommen. Die Demontage war nach 2 Stunden abgeschlossen.

ausgelöst worden, obwohl das dem Alarm zugrunde gelegte Ereignis eingetroffen ist. Beispiel: Felsblock oberhalb einer Eisenbahnlinie. Fehlalarm I: Signal rot, obwohl der Felsblock nicht abstürzt. Fehlalarm II: Signal grün, obwohl der Felsblock abstürzt.

1.5.5 Messsysteme, Datenbanken und Informationssysteme

Die vielfältige Information, die in den Messwerten steckt, wird erst durch Kombinieren des Verhaltens von verschiedenen Sensoren vollständig ausgewertet. Damit der softwaremässige Zugriff auf die Messwerte und auf die Sensoren nach übergeordneten Gesichtspunkten erfolgen kann (z. B. alle Temperatursensoren zwischen Höhe 1 und Höhe 2), müssen Datenbanken verwendet werden. Damit lassen sich Informationssysteme aufbauen, mit denen sich auf jeder Betriebsstation der Zustand des Objektes umfassend darstellen lässt.

1.6 Beispiele

1.6.1 Kleines, mobiles Messsystem

Die Kontrolle einer Brücke während der Sanierung durch ein periodisch wiederholtes Nivellement erwies sich wegen den durch den Verkehr hervorgerufenen Schwingungen als schlecht geeignet. Eine permanente Überwachung durch Neigungssensoren ermöglichte eine hinreichend dichte Erfassung der Neigungsänderungen an den

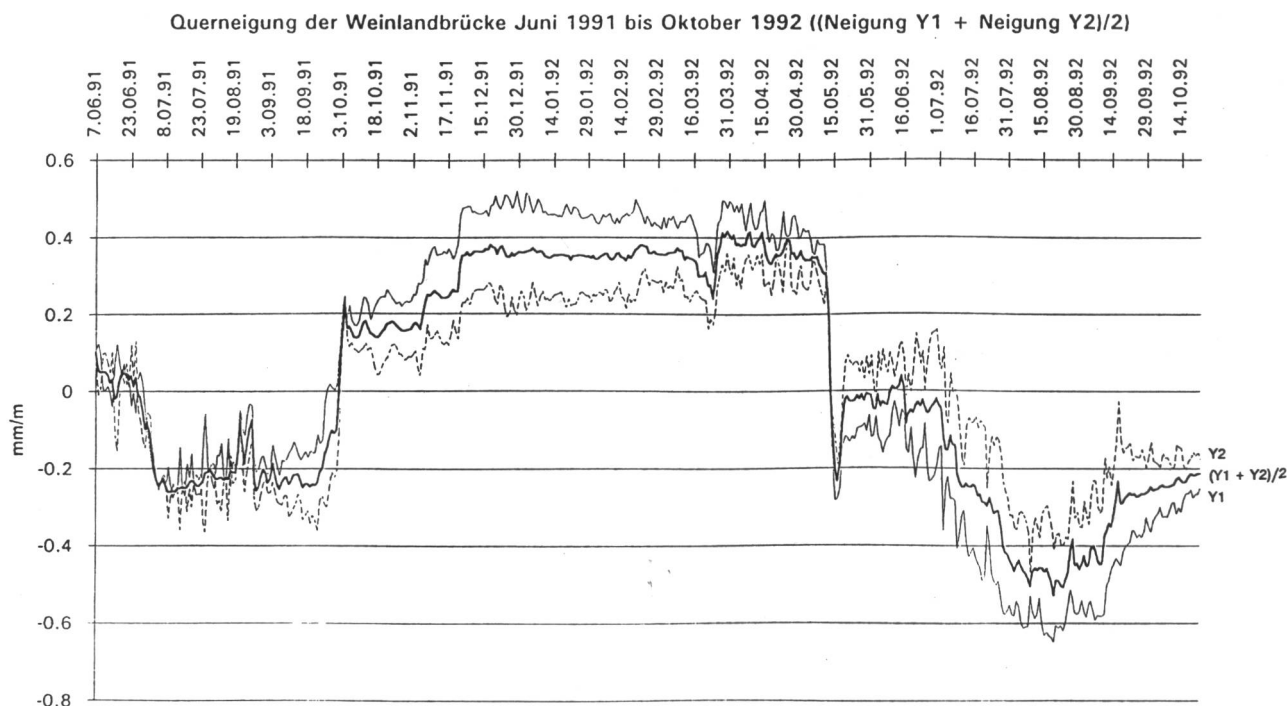


Figure 4. Inclinaison transversale de la Weinlandbrücke entre juin 1991 et octobre 1992 ((inclinaison Y1 + inclinaison Y2)/2). Inclinaison transversale de la structure porteuse sous le tablier, à la section des capteurs 1 et 2. La ligne-origine se rapporte à l'inclinaison des capteurs au moment de l'installation.

Bild 4. Querneigung des Tragwerkes unterhalb der Fahrbahnplatte im Schnitt der beiden Neigungsmesser 1 und 2. Die Nulllinie bezieht sich auf die Neigung der Neigungsmesser bei Installation des Messsystems.

Figure 5. Le système de mesure est piloté par deux PC. L'un, par l'intermédiaire d'un convertisseur analogique-digital et de multiplexeurs adressables, mesure en continu les valeurs instantanées de chaque capteur et les transmet à l'autre PC. Ce dernier est connecté par modem à plusieurs stations de travail (rôle de serveur). A la demande, chacune de ces stations peut en tout temps obtenir les valeurs stockées d'un certain secteur, en vue de n'importe quel postprocessing.

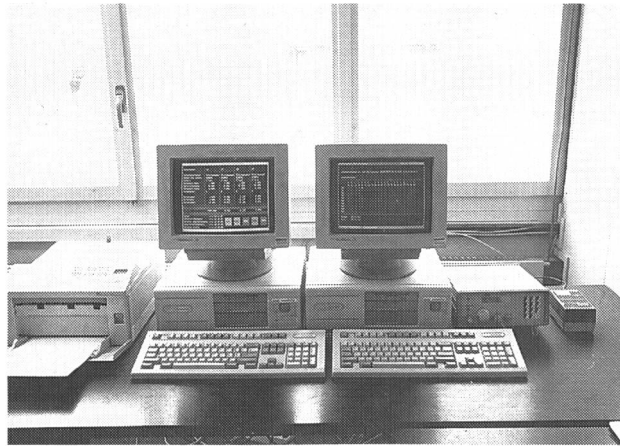


Figure 6. Schéma du système de mesure. Il s'appuie sur un système de «solexperts» pour le pilotage de multiplexeurs vers les divers capteurs. Ces multiplexeurs sont interconnectés par un câble circulaire. Avant sa connexion à l'ordinateur de calcul, ce câble circulaire passe par un dispositif pour la gestion logicielle des adresses des capteurs et pour la transformation analogique-digitale des valeurs mesurées.

PC1	Ordinateur de calcul
PC2	Gestion des données, télécommunication
SDC	Solexperts Data Controller
SB	1 Multiplexeur 1
S1	Capteur 1
R	Câble circulaire
M	Modem
HA	Connexion au Réseau
PCA1	Station de travail 1

Bild 5. Das Messsystem wird von zwei PC gesteuert. Einer der PC misst kontinuierlich über einen Analog-Digital-Wandler und über adressierbare Switchboxen die aktuellen Werte jedes Sensors und überträgt sie in den andern PC. Dieser PC ist über Modem mit mehreren Arbeitsstationen verbunden (Rolle eines Servers). Bei Bedarf kann von diesen Arbeitsstationen jederzeit der gewünschte Bereich der gespeicherten Werte zu beliebigem post processing abgeholt werden.

1.5.5 Systèmes de mesure, banques de données et systèmes d'information

L'information multiple contenue dans les valeurs observées n'est totalement exploitée que par la combinaison des mesures observées par plusieurs capteurs. Pour garantir la maîtrise logicielle des valeurs mesurées et des capteurs en fonction de plusieurs critères (par exemple tous les capteurs de température compris entre les niveaux 1 et 2), on doit utiliser des banques de données. On construit ainsi des systèmes d'information grâce auxquels on peut représenter de manière exhaustive le comportement de l'objet à partir de chaque station d'exploitation.

1.6 Exemples

1.6.1 Petit système de mesure mobile

Le contrôle d'un pont pendant sa remise en état par un nivellement périodique s'est révélé problématique à cause des oscillations provoquées par le trafic. Par contre, une surveillance permanente à l'aide de capteurs d'inclinaison a permis une saisie suffisante des variations d'inclinaison aux points d'observation, de telle sorte que non seulement les oscillations, mais aussi les modifications provoquées par les travaux ont pu être saisies. Une simple analyse visuelle des reports graphiques suffit déjà à montrer l'impact des travaux sur le pont.

1.6.2 Grand système de mesure avec installation fixe

Le contrôle d'un bâtiment bâti sur pieux dans une zone de nappe phréatique et par la technique du cuvelage a nécessité pendant les travaux la mise en place d'un grand système de mesure. La mise en charge progressive des palplanches et des pieux au cours de l'excavation a été observée en continu par des jauges de dilatation et des piézomètres. De même, la mesure du volume des eaux pompées fournit un excellent critère sur le comportement des environs. On a installé 180 capteurs au total, interrogés par le système avec une fréquence de quelques minutes. Des valeurs-limites propres à chaque capteur permettent de détecter immédiatement un comportement exceptionnel. On se reportera ici aux considérations du chapitre 1.5.4 [30].

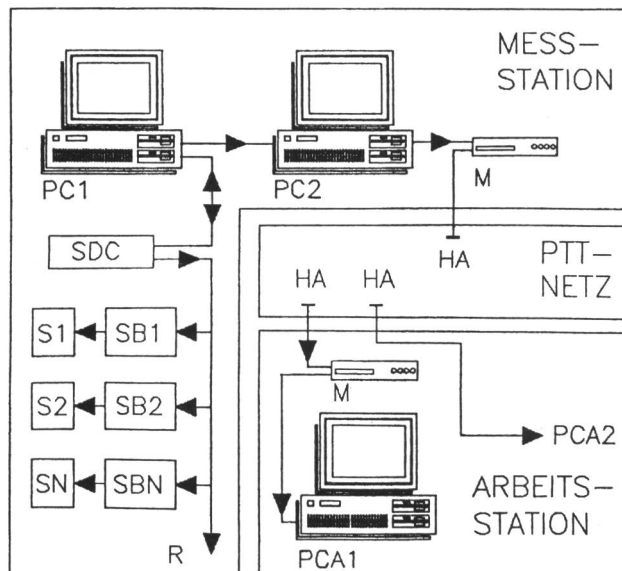


Bild 6. Schema des Messsystems. Es beruht auf einem von Sol-experts entwickelten System zum Steuern von Switchboxen der einzelnen Sensoren. Diese Switchboxen sind durch eine Ringleitung untereinander verbunden. Vor dem Anschluss an den Messcomputer führt die Ringleitung in ein Steuergerät zum software-mässigen Aufruf der Adressen der Sensoren und zum Wandeln der analogen in digitale Messwerte.

PC1	Messcomputer
PC2	Datenverwaltung, Telekommunikation
SDC	Solexperts Data Controller
SB1	Switchbox 1
S1	Sensor 1
R	Ringleitung
M	Modem
HA	Hausanschluss
PCA1	Arbeitsstation 1

Messpunkten, so dass sowohl die Schwingungen als auch die durch die Bauarbeiten hervorgerufenen Änderungen erfasst wurden. Schon eine visuelle Beurteilung der grafischen Auswertungen zeigt die Auswirkungen der Bauarbeiten auf die Brücke.

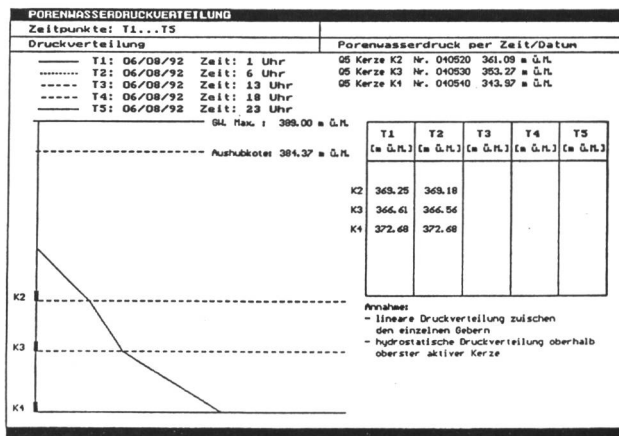


Figure 7. Exemple d'un graphique produit en continu par le système de mesure: distribution de la pression intersticielle. Tous les graphiques peuvent être obtenus par pression de touches de fonction et envoyés sur une imprimante.

Bild 7. Beispiel einer der vom Messsystem ständig nachgeführten Grafiken: Verteilung des Porenwasserdruckes. Alle Grafiken können durch Drücken von Funktionstasten aktiviert und auf einem Printer gedruckt werden.

1.6.2 Grosses, fest installiertes Messsystem

Die Kontrolle eines im Grundwasser auf Pfählen stehenden und in Deckelbauweise erstellten Gebäudes erfordert während des Baues ein grösseres Messsystem. Die durch den fortschreitenden Aushub steigende Belastung der Schlitzwände und der Pfähle wurde durch Dehnmessstreifen und Piezometer laufend gemessen. Die ebenfalls gemessene gepumpte Wassermenge lieferte ein übergeordnetes Kriterium für das Verhalten der Umgebung. Insgesamt sind 180 Sensoren installiert, die vom Messsystem in Perioden von wenigen Minuten abgefragt werden. Individuelle Grenzwerte für jeden Sensor erlauben, ein ausserordentliches Verhalten sofort zu erkennen. Dabei sind insbesondere die Überlegungen in Abschnitt 1.5.4 zu beachten [30].

Annexe n° 2

GPS (Global Positioning System) – mesure rationnelle dans un domaine de précision centimétrique

Erwin Frei

1. Introduction

La mesure assistée par satellites, avec le système GPS Navstar (Global Positioning System), permet l'emploi des méthodes les plus diverses. Celles-ci ne se distinguent pas seulement par la précision à atteindre, mais aussi par le temps requis pour la réalisation et l'analyse des mesures. La méthode décrite au chapitre 4 pour la «Mesure de déformation assistée par satellites» est favorable à une application GPS en vue d'obtenir la plus grande précision. Par conséquent, elle sera plus longue que les méthodes traditionnelles combinées aux mesures par satellites, moins précises. Si les précisions doivent se situer entre 5 et 10 mm en planimétrie et entre 15 et 30 mm en altimétrie, le temps d'observation de quelques heures peut être réduit à quelques minutes et même, dans certains cas, à quelques secondes. Il s'agit des méthodes dites «Statique Rapide» et «Stop and Go» [32], [33]. Ces deux types d'opération, qui s'emploient dans les levés techniques comme dans l'arpentage parcellaire, vont être décrits ci-dessous.

2. Les méthodes de mesure

La résolution des ambiguïtés de phase est le facteur clé des applications GPS de très haute précision, dont font partie les deux méthodes à décrire. La résolution de ces valeurs permet d'atteindre pour les lignes de base des précisions de 5 à 10 mm en planimétrie et de 15 à 30 mm en altimétrie. Ne pouvant être mesurées directement, les ambiguïtés doivent être calculées au post-traitement. Une fois obtenues, elles sont valables tant que le capteur GPS reçoit les signaux satellites sans interruption. En cas de coupure de signal, il faut redéterminer ces valeurs. Les ré-

Anhang Nr. 2

Rationelles Vermessen mit dem GPS (Global Positioning System) im Zentimeterbereich

Erwin Frei

1. Einleitung

Die satellitengestützte Vermessung mit dem Navstar GPS (Global Positioning System) erlaubt das Vermessen nach verschiedensten Methoden. Die einzelnen Methoden unterscheiden sich nicht nur in der zu erreichenden Genauigkeit, sondern auch im Aufwand zur Durchführung der Messungen als auch der Auswertungen. Die im Kapitel 4 dieses Buches beschriebene Methode zur «Satellitengestützten Deformationsvermessung» steht in diesem Sinne für eine GPS-Anwendung, bei der höchste Genauigkeit gefordert wird. Demzufolge ist auch der Aufwand im Vergleich zu satellitengestützten Methoden mit geringerer Genauigkeit sehr gross. Werden nur Genauigkeiten für die Position im Bereiche von 5 bis 10 mm und für die Höhe von 15 bis 30 mm gefordert, kann die Messzeit von einigen Stunden auf einige Minuten, in bestimmten Fällen sogar auf einige Sekunden reduziert werden. Bei diesen Methoden handelt es sich um die sog. «Rapid Static» und um die sog. «Stop and Go»-Methode [32], [33]. Diese beiden Verfahren, die in der Ingenieurvermessung wie in der Parzellarvermessung zur Anwendung kommen, werden im folgenden kurz vorgestellt.

2. Die Messmethoden

Das «pièce de resistance» für hochgenaue, relative Anwendungen mit dem GPS, zu denen die beiden zu beschreibenden Verfahren zählen, bildet das Lösen der initialen Phasenmehrdeutigkeiten (engl.: Ambiguities). Können diese Mehrdeutigkeiten gelöst werden, erreicht man Genauigkeiten für Raumvektoren im 5- bis 10-mm-Bereich für die Position und im 15- bis 30-mm-Bereich für die Höhe. Da diese Mehrdeutigkeiten nicht gemessen wer-

cepteurs GPS en mouvement sont capables de maintenir le contact satellite, ce qui permet d'appliquer des procédures de mesure spéciales.

La rentabilité de la mesure par GPS, dans les plages de précision mentionnées plus haut, est donc uniquement dictée par le temps d'observation nécessaire à la résolution des ambiguïtés. En effet, plus les mesures sont rapides, c'est-à-dire moins il faut de mesure pour la résolution des ambiguïtés, plus cette technique s'avère compétitive. L'expérience a montré que pour des récepteurs distants l'un de l'autre de moins de 5 km, les ambiguïtés peuvent être résolues fiablement en 5 minutes pour une constellation satellites acceptable (4 à 5 satellites visibles). Selon l'état actuel des connaissances, on peut exclure, dans ces plages de distance, un affaiblissement de la précision, même dans des conditions Anti-brouillage («Anti Spoofing»: signifie que le code P sur la deuxième fréquence GPS n'est pas disponible).

C'est en se basant sur ces caractéristiques fondamentales de la localisation par GPS qu'ont été développées, dans les cinq dernières années, quelques méthodes de mesure assistées par satellites. Deux d'entre elles, le Statique Rapide et le Stop and Go, qui se prêtent au levé de détails de haute précision, vont être présentées dans cet article.

2.1 Le mode Statique Rapide

Le Statique Rapide a été conçu en vue d'accélérer le processus traditionnel de mesures GPS en mode Statique. Ce développement s'est traduit par la mise au point d'un algorithme de traitement rapide des ambiguïtés. Alors qu'il faut maintenir un contact satellite de 45 à 60 minutes en mode Statique, le Statique Rapide ne demande lui que 2 à 5 minutes. La méthode se présente comme suit (figure 1). Un premier récepteur est stationné sur un point connu dit station de référence et mis en service. Les coordonnées de ce point doivent être connues dans le système de coordonnées satellite WGS 84, avec une précision inférieure à 5 m. Un deuxième récepteur est placé sur un point à déterminer (p. ex. point 1, figure 1), le contact visuel direct entre le point de référence et le point à mesurer n'étant pas indispensable. Dès que tous les satellites visibles ont été captés (5 dans le cas idéal qui est garanti actuellement sur 80% de la journée), toutes les mesures (de code et de phase) doivent être enregistrées sur les deux stations et ce pendant 5 minutes au maximum. Ensuite, le récepteur de la station 1 est arrêté, déplacé sur le deuxième site à déterminer (point 2, figure 1) puis remis en marche. Une fois que les données de ce point ont été enregistrées, on répète la procédure de mesure pour tous les

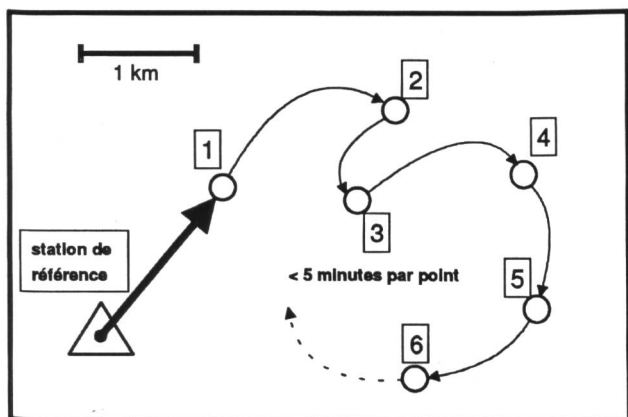


Figure 1. Le mode Statique Rapide.

den können, müssen sie rechnerisch bestimmt werden. Sobald sie bestimmt worden sind, gelten diese Werte, solange der GPS-Empfänger die Satellitensignale ohne Unterbruch empfangen kann. Wird die Verbindung unterbrochen, müssen diese Werte neu bestimmt werden. Bewegte GPS-Empfänger sind in der Lage, die Verbindung zu den Satelliten zu halten, was für spezielle Vermessungsverfahren genutzt wird.

Die Wirtschaftlichkeit der Vermessung mit dem GPS in diesen Genauigkeitsbereichen wird daher ausschliesslich vom Zeitbedarf zum Lösen der Mehrdeutigkeiten bestimmt. Je schneller, d.h. mit je weniger Messungen die Mehrdeutigkeiten gelöst werden können, desto wirtschaftlicher ist dieses Verfahren. Die Erfahrung zeigt, dass für Distanzen unter 5 km zwischen den beteiligten Empfängern die Mehrdeutigkeiten bei vernünftigen Satellitenkonstellationen (4 bis 5 Satelliten sichtbar) innerhalb von fünf Minuten zuverlässig gelöst werden können. Selbst unter A/S-Bedingungen («Anti Spoofing» d.h. der P-Code auf der zweiten GPS-Frequenz ist nicht verfügbar) ist nach heutigem Erkenntnisstand mit keiner Verschlechterung der Leistungsfähigkeit in diesen Distanzbereichen zu rechnen.

Basierend auf diesen grundlegenden Merkmalen der Vermessung mit dem GPS haben sich im Verlaufe der letzten fünf Jahre einige satellitengestützte Vermessungsmethoden entwickelt von denen zwei Verfahren näher vorgestellt werden. Es ist dies das «Rapid Static»-Verfahren und das «Stop and Go»-Verfahren. Beide Verfahren eignen sich für die rationelle Vermessung von Detailpunkten mit hoher Genauigkeit.

2.1 Das «Rapid Static»-Verfahren

Das «Rapid Static»-Verfahren hat sich direkt aus dem klassisch statischen Messen mit GPS entwickelt, indem die Messzeit auf das absolute Minimum zur Lösung der Mehrdeutigkeiten reduziert worden ist. Diese Technik ist nur durch den Einsatz von ausgeklügelten Suchalgorithmen für die ganzzahligen Phasenmehrdeutigkeiten möglich geworden. Musste man beim klassisch statischen Verfahren mindestens 45 bis 60 Minuten auf einem Punkt bleiben, genügen beim «Rapid Static»-Verfahren bereits 2 bis 5 Minuten. Das Verfahren präsentiert sich dem Anwender in folgender Form (siehe Bild 1). Ein erster Empfänger wird auf einem bekannten Punkt, dem sog. Referenzpunkt, stationiert und in Betrieb genommen. Für diesen Referenzpunkt müssen die Koordinaten im Satellitenkoordinatensystem (WGS-84) mit einer Genauigkeit von besser als 5 m bekannt sein. Ein zweiter Empfänger wird auf einem zu bestimmenden Punkt stationiert (z. B. Punkt 1 in

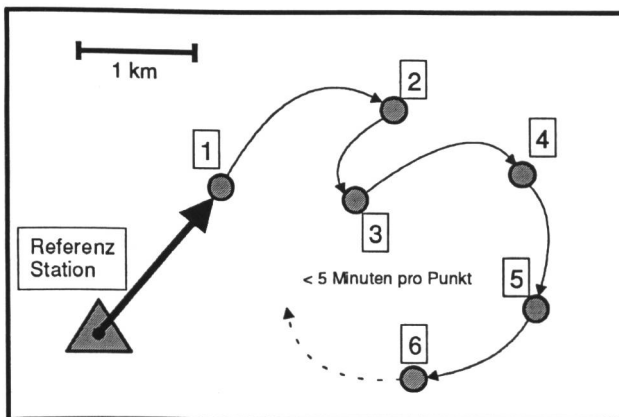


Bild 1. Das «Rapid Static»-Verfahren.

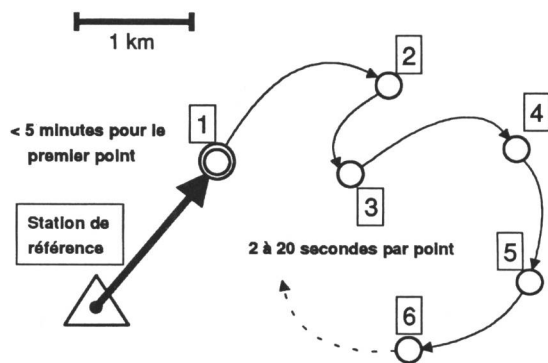


Figure 2. Le mode Stop and Go.

points à déterminer. Les données de la station de référence ainsi que celles recueillies sur les différents points sont alors analysées en commun sur un ordinateur équipé du logiciel GPS. L'analyse de chaque point dure 2 à 3 minutes environ et se déroule de façon entièrement automatique. Les coordonnées des points à déterminer par rapport à la station de référence offrent une plage de précision de 5 à 10 mm en planimétrie et de 15 à 30 mm en altimétrie.

Le mode Statique Rapide se caractérise par un rendement et une précision élevés et surtout par la facilité d'emploi des appareils sur le terrain. Entre-temps, l'analyse des données est devenue un travail de routine et ne demande pas de connaissances spéciales en GPS.

2.2 Le mode Stop and Go

Cette méthode se base sur le fait que les récepteurs GPS utilisés à des fins géodésiques sont en mesure de capter et de mesurer les signaux émis par les satellites, même lorsque le récepteur est en mouvement. Comme nous savons que les valeurs d'ambiguïté sont valables jusqu'à la coupure du signal (p. ex. par de grands arbres, les sommets de montagne, etc.), on peut déplacer un récepteur GPS d'un site à l'autre, sans qu'il soit nécessaire de redéterminer les valeurs d'ambiguïté sur le point visé. Toutefois, si ces valeurs sont connues, une époque suffit pour déterminer les coordonnées. La méthode se présente comme suit (voir figure 2). Un premier capteur est stationné sur le point de référence et mis en service. Un deuxième capteur est positionné sur un point quelconque à déterminer puis mis en marche. Le capteur commence à en-

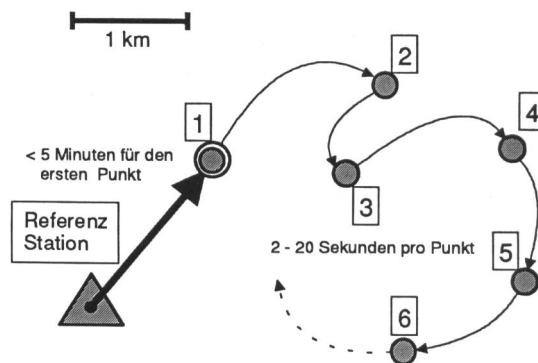


Bild 2. Das «Stop and Go»-Verfahren.

Bild 1), wobei keine direkte Sichtverbindung zwischen dem Referenzpunkt und dem zu vermessenden Punkt vorhanden sein muss. Sobald alle sichtbaren Satelliten empfangen werden (idealerweise 5, zurzeit für 80% des Tages gewährleistet), müssen sämtliche Messungen (Code- und Phasenmessungen) auf beiden Stationen während maximal 5 Minuten aufgezeichnet werden. Der Empfänger auf Station 1 wird abgeschaltet, zum zweiten zu bestimmenden Punkt transportiert (Punkt 2 in Bild 1) und dort von neuem in Betrieb genommen. Nach Datenaufzeichnung für diesen Punkt wiederholt sich das Messverfahren für sämtliche zu bestimmenden Punkte. Die Daten der Referenzstation sowie die Daten, die auf den verschiedenen Punkten gesammelt worden sind, werden nun gemeinsam auf einem Rechner mit der vorhandenen GPS-Software ausgewertet. Die Auswertung dauert pro Punkt 2 bis 3 Minuten und läuft vollständig automatisch ab. Damit liegen die Koordinaten relativ zur Referenzstation der zu bestimmenden Punkte mit Genauigkeiten für die Position im Bereich von 5 bis 10 mm und für die Höhe von 15 bis 30 mm vor.

Das «Rapid Static»-Verfahren zeichnet sich aus durch die hohe Wirtschaftlichkeit, die ansprechende Genauigkeit und vor allem durch die einfache Handhabung der Geräte im Feld. Die Datenauswertung ist mittlerweile zur Routinearbeit geworden und setzt keinerlei GPS-spezifisches Wissen voraus.

2.2 Das «Stop and Go»-Verfahren

Das «Stop and Go»-Verfahren baut auf dem Umstand auf, dass die im geodätischen Gebrauch stehenden GPS-

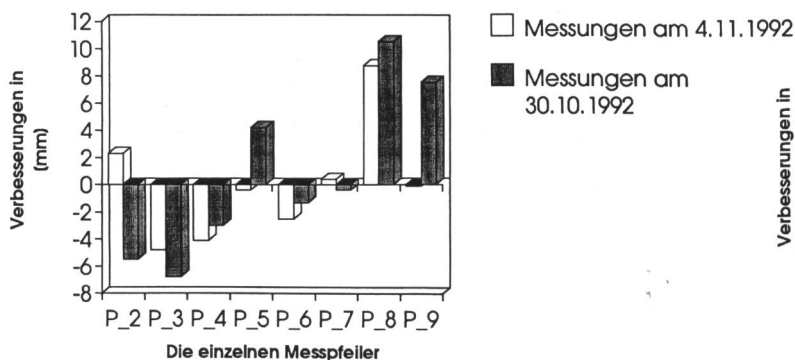


Figure 3. Erreur de distance résultant de la détermination en Stop and Go.

Figure 4. Erreur altimétrique résultant de la détermination en Stop and Go. Le pilié P 00 a été pris comme référence.

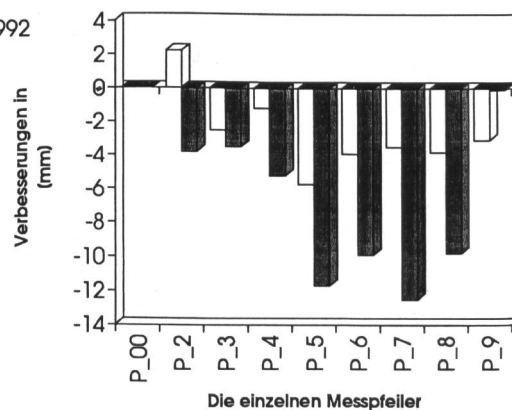


Bild 3. Distanzfehler aus der Bestimmung mit dem «Stop and Go»-Verfahren.

Bild 4. Höhenfehler aus der Bestimmung mit dem «Stop and Go»-Verfahren. Der Pfeiler P00 ist dabei als Referenz gewählt worden.

registrar les données de mesure dès qu'il reçoit au moins quatre, dans le cas idéal cinq satellites. Cinq minutes plus tard, on peut être certain que ces données suffisent à calculer la résolution des ambiguïtés. Sans arrêter le capteur, on le déplace sur le prochain site (p. ex. station 2, figure 2) tout en veillant à maintenir le contact avec au moins quatre satellites. Après la mise en station sur le nouveau point, l'enregistrement de deux à trois époques suffit pour la détermination des coordonnées avec une précision de 10 à 20 mm. On répète cette procédure jusqu'à ce que tous les points à déterminer aient été mesurés. Les données de mesure enregistrées sont alors analysées de la même façon que dans le mode Statique Rapide avec le logiciel GPS disponible. Selon le rendement de l'ordinateur utilisé, l'analyse de chaque point pour Stop and Go dure environ une minute ou moins.

Une fois que les coordonnées du premier point sont connues (point 1 dans la figure 2), on peut effectuer l'initialisation des ambiguïtés avec deux à trois époques (durée de mesure de 5 à 10 secondes).

Ce mode présente des avantages économiques évidents. Au premier abord, le transport du récepteur d'une station à l'autre semble problématique. En revanche, l'expérience a montré que le système est bien plus robuste qu'il n'en a l'air. En effet, les grandes distances entre les points peuvent être parcourues en voiture, l'antenne étant fixée sur le toit. Dans un terrain impraticable, le capteur (ou seulement l'antenne) est transporté d'un point à l'autre sur une canne spéciale. De cette manière, il est possible de mesurer de grandes quantités de points en très peu de temps. Même si les ambiguïtés se perdent de temps à autre, on peut faire une réinitialisation en moins de cinq minutes en un point quelconque.

3. Résultats

Pour illustrer la précision de la méthode, nous allons présenter ci-dessous les résultats de deux mesures Stop and Go réalisées en octobre et novembre 1992 sur la distance d'étalonnage EDM, le long du Rhin à Heerbrugg (canton de St-Gall). Chaque pilier de mesure a été occupé pendant 20 secondes environ et, dans ce laps de temps, quatre époques ont été enregistrées. Pour ce test, l'analyse fait ressortir une erreur moyenne de 2,3 mm pour la détermination de la distance en Stop and Go et une erreur moyenne de 4,1 mm pour la différence de hauteur.

4. Conclusion

Méthodes de mesure assistées par satellites, le Statique Rapide et le Stop and Go permettent à l'utilisateur d'effectuer de façon rationnelle et précise des levés de détail sur de courtes distances (3 à 6 km). Ces deux modes sont utilisés avec succès dans les levés techniques, l'arpentage parcellaire, le cadastre et pour la surveillance de zones de terrain critiques. Deux conditions sont nécessaires à l'emploi de ces types d'opération: un terrain praticable et le contact direct et simultané des deux stations avec au moins quatre satellites. La localisation par GPS offre plusieurs avantages: elle ne dépend pas des conditions climatiques, le point de référence peut être choisi sur un terrain stable et le contact visuel entre les points sur le terrain n'est pas nécessaire. De plus, avec cette méthode, les tâches fastidieuses consistant à déterminer des points de station supplémentaires pour les instruments deviennent superflues lorsqu'il n'y a pas de contact visuel entre les points. Les précisions (1σ) obtenues sont de 3 à 10 mm pour la position et de 10 à 30 mm pour l'altitude.

Empfänger in der Lage sind, die Satellitensignale zu empfangen und auszumessen, auch wenn der Empfänger bewegt wird. Da nun die Mehrdeutigkeiten solange Gültigkeit haben, bis die Verbindung zum Satelliten unterbrochen wird (z.B. durch hohe Bäume, Bergspitzen usw.), kann ein GPS-Empfänger von einer Station zur anderen transportiert werden, ohne die Mehrdeutigkeiten auf dem Zielpunkt neu bestimmen zu müssen. Sind die Mehrdeutigkeiten jedoch bekannt, genügt eine Messepoche, um die Koordinaten bestimmen zu können. Das Verfahren präsentiert sich dem Anwender in folgender Form (siehe Bild 2). Ein erster Empfänger wird auf dem Referenzpunkt stationiert und in Betrieb genommen. Ein zweiter Empfänger wird auf einem beliebigen zu bestimmenden Punkt stationiert und ebenfalls in Betrieb genommen. Sobald mindestens vier, idealerweise fünf Satelliten empfangen werden, beginnt der Empfänger mit dem Aufzeichnen der Messdaten. Nach fünf Minuten kann mit Sicherheit angenommen werden, dass die Mehrdeutigkeiten mit diesem Datenmaterial gelöst werden können. Ohne den Empfänger abzustellen, wird er nun zur nächsten Station transportiert (z.B. Station 2 in Bild 2). Dabei ist zu beachten, dass die Verbindung zu mindestens vier Satelliten gehalten werden kann. Nach Stationierung auf dem neuen Punkt genügt das Aufzeichnen von zwei bis drei Messepochen für die Bestimmung der Koordinaten mit der für «Stop and Go» beschriebenen Genauigkeit von 10 bis 20 mm. Dieses Prozedere wird wiederholt, bis sämtliche zu bestimmenden Punkte vermessen sind. Die aufgezeichneten Messdaten werden analog dem «Rapid Static»-Verfahren mit der verfügbaren GPS-Software ausgewertet. Die Auswertung für das «Stop and Go»-Verfahren dauert pro Punkt eine Minute oder kürzer, je nach Rechenleistung des verfügbaren PCs.

Sind die Koordinaten für den ersten Punkt bekannt (Punkt 1 in Bild 2), kann die Initialisierung der Mehrdeutigkeiten mit zwei bis drei Messepochen bewerkstelligt werden (Messdauer von 5 bis 10 Sekunden).

Die wirtschaftlichen Vorteile dieses Verfahrens sind offensichtlich. Der Transport des Empfängers von der einen Station zur nächsten Station scheint auf den ersten Blick recht problematisch. Die Erfahrung zeigt jedoch, dass das Verfahren robuster ist als es scheint. Grössere Distanzen zwischen einzelnen Punkten können durchaus mit dem Auto überbrückt werden, indem die Antenne auf dem Autodach befestigt wird. In unwegsamem Gelände wird der Empfänger (oder nur die Antenne) auf einem speziellen Stab von Punkt zu Punkt getragen. Mit diesem Verfahren können in kürzester Zeit grosse Punktmengen vermessen werden. Selbst wenn die Mehrdeutigkeiten ab und zu durch ein Abdecken der Satelliten verlorengehen, kann die Initialisierung in weniger als fünf Minuten an einem beliebigen Ort wiederholt werden.

3. Resultate

Zur Illustration der Genauigkeit der Verfahren werden im folgenden die Resultate von zwei «Stop and Go»-Messungen präsentiert, die im Oktober und im November 1992 auf der EDM-Eichstrecke auf dem Rheindamm bei Heerbrugg (SG) durchgeführt worden sind. Dabei ist jeder Messpfeiler während etwa 20 Sekunden besetzt worden. Während dieser Zeit wurden in der Regel 4 Messepochen aufgezeichnet. Die Auswertung hat für diesen Test einen mittleren Fehler für eine Distanzbestimmung mit dem «Stop and Go»-Verfahren von 2,3 mm und einen mittleren Fehler für die Höhendifferenz von 4,1 mm ergeben.

4. Zusammenfassung

Die «Rapid Static»- und die «Stop and Go»-Methode bieten dem Anwender ein satellitengestütztes Vermessungsverfahren zur rationellen und genauen Bestimmung von Detailpunkten in kleinräumigen Gebieten (3 bis 6 km). Diese Verfahren werden in der Ingenieurvermessung als auch in der Parzellar- und Katastervermessung erfolgreich angewendet. Die Überwachung kritischer Geländepartien kann mit diesen satellitengestützten Methoden für bestimmte Aufgaben sehr rationell durchgeführt werden. Voraussetzungen sind die Begehrbarkeit des Geländes

Annexe n° 3: Prévention et correction des influences d'erreurs systématiques du GPS

Les influences systématiques peuvent en premier lieu provenir des *satellites*, plus particulièrement lorsque les exploitants du système provoquent des dysfonctionnements et des dégradations intentionnelles. Le DoD a décidé d'altérer artificiellement la qualité des données envoyées par les satellites et la précision des paramètres des horloges. La précision des éphémérides «Broadcast» diffusées par les satellites avant l'introduction de «selective availability (SA)» est suffisante pour des réseaux d'une amplitude de 5 km environ. Toutefois, il peut résulter des erreurs systématiques d'orbites avec le SA, surtout pour des mesures brèves de quelques minutes à moins d'une heure. Celles-ci influencent plus particulièrement l'échelle et l'orientation spatiale du réseau. On obtient une estimation sommaire de l'influence des erreurs d'orbites avec la formule empirique de *Bauersima* [10]:

$$db/b = dr/r$$

où: db = erreur de la ligne de base de longueur b ; dr = erreur d'orbites; r = distance moyenne jusqu'au satellite (~ 25000 km). Afin de pouvoir garantir par exemple l'influence des *erreurs d'orbites* à $db < 1$ mm pour une ligne de base $b = 5$ km, on exige des orbites de haute qualité avec des écarts maxima $dr < 5$ m. Celles des éphémérides «Broadcast» diffusées par les satellites ne répondent pas – sous SA – à ces exigences pour des périodes d'observation de quelques minutes. Par conséquent, il faut examiner la qualité des orbites et, en cas de besoin, se procurer les orbites précises calculées ultérieurement. Ces dernières pourront par exemple être obtenues au Center for orbit determination in Europe (Code) à Berne. Elles sont déterminées par des réseaux supérieurs de poursuite (tracking) européens ou mondiaux. Ce centre est exploité par l'Institut astronomique de l'Université de Berne (AIUB) en collaboration avec l'Institut de géodésie appliquée (IfaG) de Francfort, de l'Institut géographique national (IGN) de Paris, du Statens Kartverk norvégien et de l'Office fédéral de topographie (S+T) à Wabern.

Les signaux à micro-ondes des satellites rencontrent sur leur parcours différentes couches atmosphériques, plus particulièrement les couches ionosphériques chargées électriquement. Les signaux y subissent des retards qui peuvent systématiquement influencer les mesures ainsi que les résultats. L'influence de l'*ionosphère* peut conduire à des erreurs d'échelle des lignes de base jusqu'à quelques ppm, avant tout lors de mesures diurnes. Comme les ondes L1 et L2 sont influencées différemment par l'ionosphère, il est judicieux de calculer une combinaison linéaire L3 «sans ionosphère» des deux mesures, à partir des mesures simultanées des deux ondes porteuses.

und die direkte, gleichzeitige Sichtverbindung auf beiden Stationen zu mindestens vier Satelliten. Die Vorteile der GPS-gestützten Verfahren liegen in der Wetterunabhängigkeit, dem Umstand, dass der Referenzpunkt in stabilem Gelände gewählt werden kann und dass die Sichtverbindung zwischen Punkten im Gelände nicht gewährleistet sein muss. Zudem entfallen aufwendige Arbeiten zur Bestimmung von zusätzlichen Instrumentenstandorten, sofern das Gelände nicht von einem einzelnen Punkt eingesehen werden kann. Die Genauigkeiten (1σ) dieser Verfahren liegen für die Position im Bereich von 3 bis 10 mm und für die Höhe im Bereich von 10 bis 30 mm.

Anhang Nr. 3: Vermeidung und Korrektur von systematischen Fehlereinflüssen bei GPS

Systematische Einflüsse können primär von den *Satelliten* herrühren, wenn diese von den Systembetreibern gewollte Verschlechterungen oder gar Funktionsstörungen aufweisen. Denn das DoD hat Massnahmen ergriffen, die Qualität der ausgesendeten Satelliten-Bahndaten sowie die Genauigkeit der Satelliten-Uhrparameter künstlich zu verschlechtern. Die Genauigkeit der ausgesendeten «Broadcast»-Ephemeriden war vor der Einführung der «selective availability (SA)» für Netze von ca. 5 km Ausdehnung stets ausreichend. Mit SA können jedoch vor allem bei kurzen Messzeiten (Minuten bis eine Stunde) systematische Fehler aus Satelliten-Bahnfehlern resultieren. Diese beeinflussen den Massstab und die räumliche Orientierung der Netze. Eine grobe Abschätzung des Einflusses von Satelliten-Bahnfehlern erhält man mit der Faustformel von *Bauersima* [1]: $db/b = dr/r$ wobei: db = Fehler an der Basislinie der Länge b ; dr = Bahnfehler des Satelliten; r = mittlere Distanz zum Satellit (~ 25000 km). Um z. B. bei einer Basislinienlänge von $b = 5$ km den Einfluss der Satelliten-Bahnfehler auf die Basis $db < 1$ mm garantieren zu können, sind Bahndaten von hoher Qualität mit maximalen Abweichungen $dr < 5$ m nötig. Die von den Satelliten ausgesendeten «Broadcast»-Ephemeriden genügen unter SA diesen Anforderungen über kurze Zeitperioden (einige Minuten) nicht. Die Qualität der Bahndaten ist somit zu überprüfen. Notfalls sind nachträglich berechnete, sogenannte präzise Bahnen zu beschaffen. Solche genaueren, durch Bahnbestimmung aus simultan erfassten Messungen von übergeordneten europa- oder weltweiten Trackingnetzen berechneten Bahndaten können z. B. vom Center for orbit determination in Europe (Code) in Bern bezogen werden. Dieses Center wird vom Astronomischen Institut der Universität Bern (AIUB) in Zusammenarbeit mit dem Institut für angewandte Geodäsie (IfaG) in Frankfurt, dem Institut géographique national (IGN) in Paris, dem norwegischen Statens Kartverk und dem Bundesamt für Landestopographie (L+T) in Wabern betrieben. Die Mikrowellensignale der Satelliten durchlaufen auf ihrem Weg zum Empfänger die verschiedenen Atmosphärenschichten, insbesondere auch die elektrisch aufgeladene Ionosphärenschicht. Dabei erfahren die Signale Verzögerungen, welche die Messungen und damit die Resultate systematisch beeinflussen können. Der Einfluss der *Ionosphäre* kann vor allem bei Tagesmessungen zu Massstabsabweichungen der Basislinien bis zu einigen ppm führen. Da die L1- und L2-Wellen in der Ionosphäre unterschiedlich stark beeinflusst werden, gelingt es, aus den simultanen Messungen an beiden Trägerwellen eine «ionosphärenfreie» Linearkombination L3 der beiden Messwerte zu berechnen.

On tente de contourner cette technique pour des lignes de base courtes car le bruit de fond des phases L3 est environ trois fois plus élevé que celui de L1 et L2. Dans ce cas, ou lorsqu'un réseau présente un mélange de mesures à une et à deux fréquences, le Berner GPS Software peut calculer un modèle de la teneur en électrons de l'ionosphère, ce qui permet ultérieurement la correction des mesures L1 et L2. Un tel modèle permet de déterminer la déformation de l'échelle en dessous de 1 ppm due aux influences ionosphériques. La solution finale présente alors une restitution corrigée avec ce modèle des mesures de phase L1 et L2. A titre de contrôle, une solution L3 sera calculée à chaque fois avec la combinaison linéaire sans ionosphère, dans laquelle l'échelle ne sera théoriquement pas modifiée. Mais la solution L3 indique une erreur moyenne environ 3 fois plus grande des observations de phase, ce qui conduit dans un petit réseau de 10 km environ à diminuer la précision relative en planimétrie et en altimétrie. L'expérience acquise avec les réseaux de 6 barrages montre que l'erreur globale (rms) des 7 paramètres des transformations d'Helmert avec les solutions L3 est en moyenne 2 fois supérieure à celle issue des solutions L1/L2.

Les signaux des satellites, semblables aux micro-ondes de la mesure électronique de distance (MED), subissent d'autres retards (déformations) dans les couches inférieures de l'atmosphère (*réfraction troposphérique*), qui devront être corrigés avec des modèles appropriés. Les modèles atmosphériques standard ou les modèles s'appuyant sur des données météorologiques mesurées pourront s'appliquer pour la correction de la réfraction troposphérique. Ce paramètre peut aussi être estimé à l'aide des mesures GPS pour chaque station et session. Les différences relatives non modélisées de la troposphère peuvent également causer des écarts altimétriques de quelques millimètres dans des réseaux locaux, plus particulièrement lorsque la température et l'humidité de l'air sont élevées. L'expérience montre que les erreurs provoquées par les effets de la troposphère n'influencent pratiquement pas les coordonnées planimétriques. On peut renoncer à relever les données météo dans un petit réseau sans grandes différences d'altitude et sans exigences particulières pour ces dernières.

Le Berner GPS Software dispose pour la correction de la réfraction troposphérique de plusieurs modèles avec ou sans prise en compte des données météo locales mesurées. Comme solution standard (1), c'est chaque fois la correction troposphérique zénithale qui est calculée sur la base d'une atmosphère standard. Les données météo des stations individuelles ne sont en principe pas introduites pour de petits réseaux. Par contre, on calculera deux modèles supplémentaires à partir du modèle standard (1): (2) Estimation des paramètres troposphériques locaux, c'est-à-dire une correction zénithale résiduelle par station et par session de données GPS; (3) Estimation d'un modèle troposphérique local avec une prise en compte altimétrique linéaire des altérations troposphériques zénithales des signaux. Alors que le modèle standard (1) suffit amplement la plupart du temps pour les terrains plats et livre souvent de meilleurs résultats, le modèle complémentaire apporte quant à lui de meilleurs résultats dans des réseaux avec de grandes différences d'altitude. La réfraction troposphérique, sur les sessions de plusieurs heures, ne se répercute, selon la modélisation choisie, que sur les altitudes des points, et constitue pour la précision de celles-ci le facteur limitant.

Bei kurzen Basislinien versucht man diese Technik zu umgehen, da das Rauschen der L3-Phasen ca. dreimal grösser ist als dasjenige von L1 und L2. In diesem Fall oder falls in einem Netz eine Mischung von Ein- und Zweifrequenzmessungen vorliegt, können bei der Berner GPS-Software aus den Differenzen zwischen den L1- und L2-Phasenmessungen Parameter eines Einschicht-Modelles des Elektronengehaltes der Ionosphäre gerechnet werden, die nachträglich der Korrektur der L1- und L2-Messungen dienen. Ein solches Modell erlaubt es üblicherweise, den durch Ionosphäreneinflüsse verzerrten Massstab auf unter 1 ppm genau zu bestimmen. Die Schlusslösung stellt dann eine mit diesem Modell korrigierte Auswertung der L1- und L2-Phasenmessungen dar. Zur Kontrolle wird jeweils eine Lösung mit der ionosphärenfreien Linearkombination L3 gerechnet, bei welcher der Massstab theoretisch unverfälscht ist. Die L3-Lösung weist aber einen ca. dreimal grösseren mittleren Fehler der Phasenbeobachtungen auf, was in kleinen Netzen bis ca. 10 km zu entsprechend geringerer relativer Lage- und Höhengengenauigkeit führt. Die Erfahrung in den 6 Staumauernetzen zeigt, dass der Gesamtfehler (rms) der 7-Parameter-Helmert-Transformationen mit den L3-Lösungen durchschnittlich um den Faktor 2 grösser ist als mit den L1/L2-Lösungen.

Ähnlich wie die Mikrowellen bei der elektronischen Distanzmessung (EDM) erfahren die Satellitensignale in der unteren Atmosphärenschicht weitere Signalverzögerungen (*troposphärische Refraktion*), welche mit geeigneten Modellen korrigiert werden müssen. Standard-Atmosphärenmodelle oder Modelle, welche sich auf gemessene Meteodaten stützen, können zur Korrektur der troposphärischen Refraktion beigezogen werden, oder es kann pro Station und Session ein Troposphären-Parameter aus den GPS-Messungen selber geschätzt werden. Nicht modellierte relative Unterschiede in der Troposphäre können auch in lokalen Netzen, insbesondere bei hohen Temperaturen und hohen Luftfeuchtigkeiten, fehlerhafte Höhenunterschiede von einigen Millimetern verursachen. Erfahrungsgemäss bewirken die Troposphäreneffekte Höhenfehler während die Lagekoordinaten grösstenteils unbeeinflusst bleiben. Auf die Erfassung von Meteodaten kann im allgemeinen verzichtet werden, insbesondere falls in kleinen Netzen ohne grosse Höhendifferenzen nur eine beschränkte Höhengengenauigkeit erzielt werden soll.

Zur Korrektur der troposphärischen Refraktion stehen bei der Berner GPS-Software verschiedenste Modelle mit oder ohne Berücksichtigung lokal gemessener Meteodaten zur Verfügung. Als Standardlösung (1) wird jeweils die sog. troposphärische Zenitkorrektur unter Verwendung einer Standardatmosphäre berechnet. Individuelle Stations-Meteodaten werden normalerweise in kleinen Netzen nicht eingeführt. Dagegen werden ausgehend vom Standardmodell (1) zwei zusätzliche Modelle berechnet: (2) Schätzen von lokalen Troposphären-Parametern, d.h. einer Rest-Zenitkorrektur pro Station und Session aus den GPS-Messdaten; (3) Schätzen eines lokalen Troposphärenmodells mit linearer Höhenabhängigkeit der troposphärischen zentralen Laufzeitverzögerung. Während in flachem Gelände das Standardmodell (1) meist vollaufgenügt und oft gar die besten Resultate liefert, bringt insbesondere das Zusatzmodell (3) in Netzen mit grossen Höhenunterschieden leicht bessere Resultate. Bei Sessionen über mehrere Stunden wirkt sich die troposphärische Refraktion resp. ihre unterschiedliche Modellierung jedoch praktisch nur auf die Punkthöhen aus, wobei sie zum begrenzenden Genauigkeitsfaktor wird.

Annexe n° 4: Exemples de mesures GPS

Réseaux GPS de Montsalvens et de Rossens; résultats de la compensation combinée du réseau de Montsalvens 1990.

Le réseau Montsalvens [17] a servi d'exemple pour les résultats d'une compensation avec le programme LTOP. Les mesures GPS de ce réseau ont été effectuées en 2 jours, en juillet et en octobre 1990. L'orientation et l'échelle ont été définies par les mesures GPS.

Anhang Nr. 4: Beispiele von GPS-Messungen

GPS-Netze Montsalvens und Rossens; Resultate der kombinierten Ausgleichung im Netz Montsalvens 1990.

Als Beispiel für die Resultate einer Ausgleichung mit dem Programm LTOP soll das Netz Montsalvens [17] dienen. In diesem Netz wurden an je zwei Tagen im Juli und Oktober 1990 GPS-Messungen durchgeführt. Die Orientierung und der Massstab des Netzes werden durch die GPS-Messungen definiert.

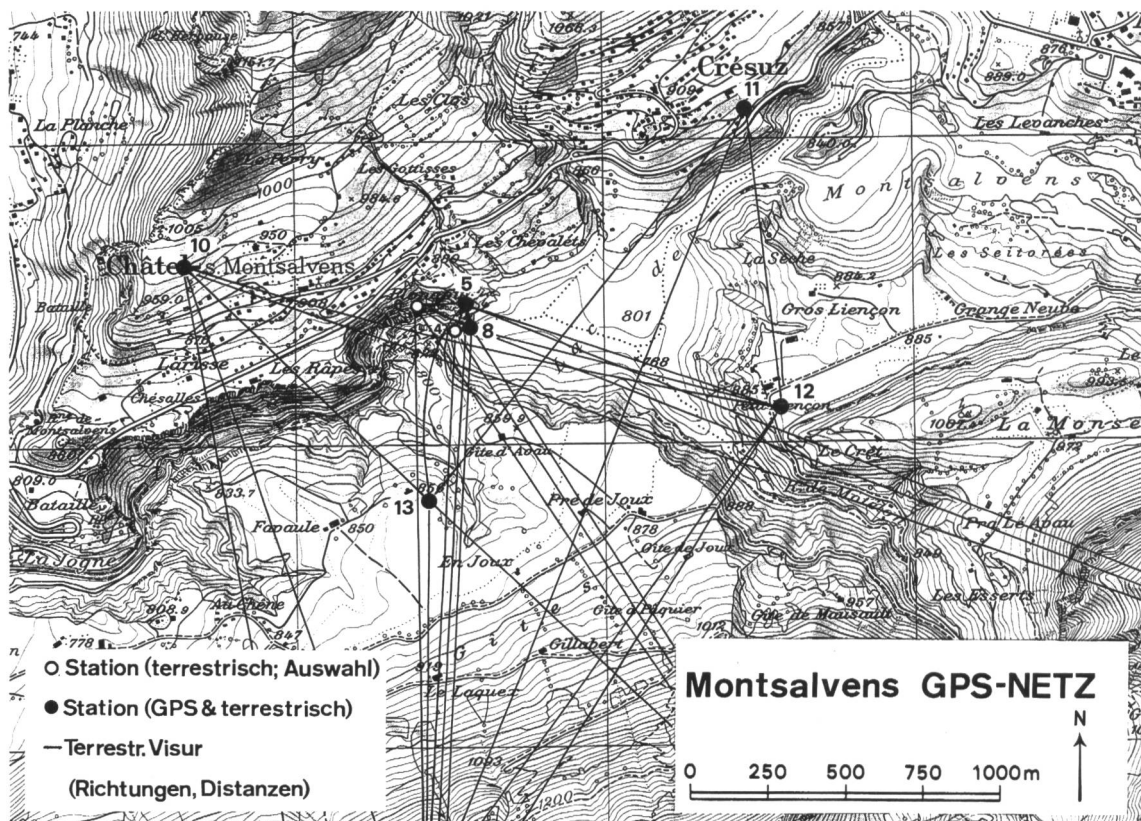


Figure 1. Réseau GPS et mesures de rattachement de Montsalvens.

Bild 1. GPS-Netz und terrestrische Anschlussmessungen Montsalvens.

Tableau 1. Valeurs a priori de la compensation globale combinée.

Erreur moyenne de centrage	0,2 mm
Erreur moyenne d'une direction	3 ^{cc}
Erreur moyenne d'un angle vertical	4 ^{cc}
Erreur moyenne d'une distance	0,3 mm + 0,5 ppm
Erreur moyenne GPS en planimétrie	1,5 mm
Erreur moyenne GPS en altimétrie	3,0 mm

Tabelle 1. A-priori-Annahmen der kombinierten Gesamtausgleichung.

Mittlerer Zentrierfehler	0,2 mm
Mittlerer Fehler der Richtungen	3 ^{cc}
Mittlerer Fehler der Höhenwinkel	4 ^{cc}
Mittlerer Fehler der Distanzen	0,3 mm + 0,5 ppm
Mittlerer Fehler der GPS Lage	1,5 mm
Mittlerer Fehler der GPS Höhe	3,0 mm

Tableau 2. Résultats de la compensation en planimétrie et en altimétrie.

	Situation	Altitude
Erreur moyenne des translations des centres de gravité par session GPS	0,9 mm	1,9 mm
Nombre d'observations surabondantes	151	60
Facteur de variance a posteriori (total)	1,11	1,00
Facteur de variance a posteriori (GPS)	1,07	0,75
Facteur d'échelle (EDM)	1,02 ± 0,54 ppm	

Tabelle 2. Resultate der kombinierten Lage- und Höhenausgleichung.

	Lage	Höhe
Mittlere Fehler der Translationen der Schwerpunkte pro GPS-Session	0,9 mm	1,9 mm
Überbestimmungen	151	60
A-posteriori-Varianzfaktor (total)	1,11	1,00
A-posteriori-Varianzfaktor (GPS)	1,07	0,75
Massstabsfaktor (EDM)	1,02 ± 0,54 ppm	

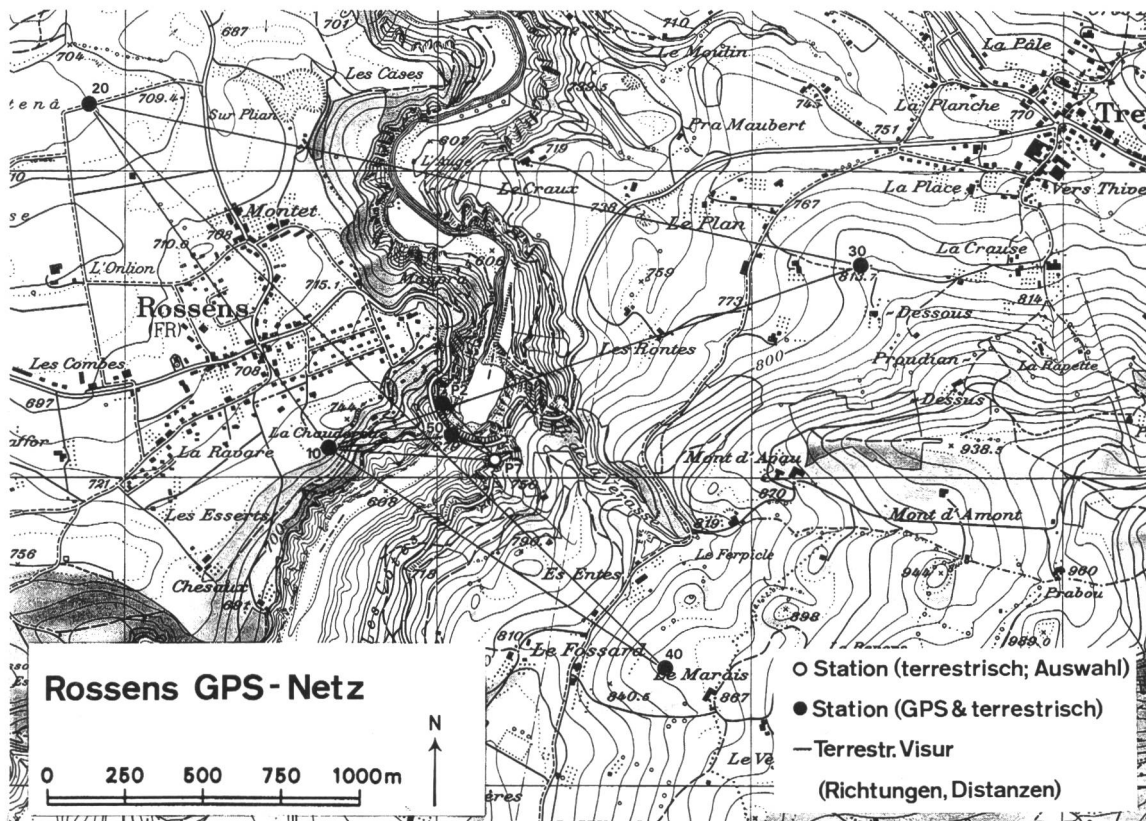


Figure 2. Réseau GPS et mesures de rattachement de Rossens.

Bild 2. GPS-Netz und terrestrische Anschlussmessungen Rossens.

Tableau 3. Résidus [en mm] des coordonnées GPS issues de la compensation globale incluant les mesures terrestres.

Station	V _Y	V _X	V _H
3 juillet			
9005	-0,7	0,8	0,8
9010	0,5	1,0	0,1
9011	-0,9	-0,2	-1,0
9012	1,5	-0,3	-0,8
9013	-0,4	-1,3	0,9
23 octobre			
9005	-0,7	2,8	-2,5
9010	1,3	-3,0	5,4
9011	0,5	-1,6	-1,1
9012	-0,5	1,9	-0,5
9013	-0,6	-0,1	-1,3

Station	V _Y	V _X	V _H
4 juillet			
9005	-0,6	1,0	0,8
9008	-0,4	-0,3	-1,2
9010	0,2	2,4	-3,1
9011	-1,3	1,2	0,4
9012	0,3	-3,8	2,0
9013	2,3	-0,6	1,1
24 octobre			
9005	-0,4	2,3	-1,2
9010	0,7	-2,1	-1,0
9011	0,5	0,5	2,2
9012	0,3	-0,2	0,2
9013	-1,1	-0,4	-0,1

Tabelle 3. Verbesserungen [in mm] an den GPS-Koordinaten aus der Gesamtausgleichung mit terrestrischen Messungen.

Station	V _Y	V _X	V _H
3. Juli			
9005	-0,7	0,8	0,8
9010	0,5	1,0	0,1
9011	-0,9	-0,2	-1,0
9012	1,5	-0,3	-0,8
9013	-0,4	-1,3	0,9
23. Oktober			
9005	-0,7	2,8	-2,5
9010	1,3	-3,0	5,4
9011	0,5	-1,6	-1,1
9012	-0,5	1,9	-0,5
9013	-0,6	-0,1	-1,3

Station	V _Y	V _X	V _H
4. Juli			
9005	-0,6	1,0	0,8
9008	-0,4	-0,3	-1,2
9010	-0,2	2,4	-3,1
9011	-1,3	1,2	0,4
9012	0,3	-3,8	2,0
9013	2,3	-0,6	1,1
24. Oktober			
9005	-0,4	2,3	-1,2
9010	0,7	-2,1	-1,0
9011	0,5	0,5	2,2
9012	0,3	-0,2	0,2
9013	-1,1	-0,4	-0,1

Literatur

- [1] Schweizerisches Nationalkomitee für Grosse Talsperren (1989): Messanlagen zur Talsperrenüberwachung; Konzept, Zuverlässigkeit und Redundanz; überarbeiteter Sonderdruck aus «wasser, energie, luft – eau, énergie, air», 78 (1986), Heft 7/8, CH-5401 Baden. Comité National Suisse des Grands Barrages (1989): Dispositif d'auscultation des barrages; concept, fiabilité et redondance; Tiré à part revu de «wasser, energie, luft – eau, énergie, air» 78 (1986), Heft 7/8, CH-5401 Baden.
- [2] Stengele, R.: Aktuelle Probleme der Talsperrenüberwachung am Beispiel der Staumauer Sella, 1991, Bericht 180 des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich.
- [3] Kahmen, H.: Selbsttätig zielende tachymetrische Vermessungssysteme für Aufgaben der Ingenieurgeodäsie. Ingenieurvermessung 84.
- [4] Aeschlimann, H., und Clement, A.: Die automatische Messanlage Vicosoprano. VPK 7/92, S. 392.
- [5] Aeschlimann, H.: Möglichkeiten von automatischen Messsystemen. Ingenieurvermessung 92.
- [6] Katowski, O.: Ein Präzisionspolar-Messsystem (PPMS) im Einsatz bei Überwachungsmessungen und dynamischer Absteckung. Ingenieurvermessung 92.
- [7] Niemeier, W., Wunderlich, T., Dr.: Geodetic Monitoring of Dams, A Comparison of Various Concepts. Proceedings of 5th Int. Symposium on Deformation Measurements, Fredricton N. B., Canada, 1988.
- [8] Keller, W.: Das Programmsystem Helmert/77 zur Berechnung allgemeiner geodätischer Netze.
- [9] Niemeier, W., und Tenger, D.: PANDA – «A menu-driven software package», Proceedings of 5th Int. Symposium on Deformation Measurements, Fredericton N.B., Canada, 1988.
- [10] Bauersima, I.: NAVSTAR/Global Positioning System (GPS III). Mitteilungen der Satellitenbeobachtungsstation Zimmerwald, Nr. 10, Astronomisches Institut der Universität Bern, 1983.
- [11] Chablais, H.: Le réseau actuel de triangulation et le nouveau réseau national. Vermessung, Photogrammetrie und Kulturtechnik 12/1992.
- [12] Frei, E., Ryf, A., und Scherrer, R.: Das GPS (Global Positioning System) und seine Anwendungsmöglichkeiten in der Ingenieurvermessung. XI. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung, ETH Zürich, 21.–26. September 1992, Dümmlers, Bonn, 1992.
- [13] Geiger, A., Kahle, H.-G., Schneider, D., Rothacher, M., Beutler, G. und Gurtner, W.: Das GPS-Testnetz Turtmann, Netzanalyse und Messkampagne 1985. Vermessung, Photogrammetrie und Kulturtechnik 7/1986.
- [14] Geiger, A., und Schmidt, M. J.: Das Global Positioning System GPS: NAVSTAR – ein Navigationssystem für zivile und militärische Nutzung. Vermessung, Photogrammetrie und Kulturtechnik 7/1992.
- [15] Rothacher, M., Beutler, G., Gurtner, W., und Schildknecht, Th.: Documentation for Bernese GPS Software Version 3.0., Astronomisches Institut der Universität Bern, 1988.
- [16] Schneider, D., und Wunderlin, N.: RAUMTRI, Dreidimensionale Netzausgleichung in einem geozentrischen, kartesischen Koordinatensystem. Bericht Nr. 45, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich, 1981.
- [17] Wiget, A. A., und Schneider, D.: Erfahrungen mit GPS in Staumauer-Überwachungsnetzen. XI. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung, ETH Zürich, 21.–26. September 1992, Dümmlers, Bonn, 1992.
- [18] Grün, A., Runge, A.: Projekt Heinzenberg-Präzisionsphotogrammetrie im Gebirge, VPK 7/87 pg. 271.
- [19] Pradervand, J. C.: Mensuration numérique par photogrammétrie – test comparatif. VPK 12/92 pg. 721.
- [20] Kölbl, O., Stuby, J.-J.: Mesure de déplacement du terrain à l'aide de photographies multitemporaires.
- [21] Finsterwalder, R.: Geschwindigkeitsmessungen an Gletschern mittels Photogrammetrie. Zeitschrift für Gletscherkunde, Band 19, p. 251 ff., 1931.
- [22] Flotron, A.: Verschiebungsmessungen aus Luftbildern. Mitteilung Nr. 41, 1979. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie.
- [23] Häberli, W., King, L., Flotron, A.: Surface Movement and Lichen-cover Studies at the Active Rock Glacier near the Grubengletscher. Arctic and Alpine Research, Vol. 11, No. 4, 1979.
- [24] Carosio, A.: Verfahren der multivariaten Statistik zur Beurteilung der Resultate und der Zuverlässigkeit geodätischer Messsysteme. IGP-ETH, Zürich, 1983.
- [25] Carosio, A.: Fehlertheorie und Ausgleichsrechnung. IGP-ETH Zürich, 1992.
- [26] Guedes, Q. M., und Coelho, P. S. M.: Statistical behaviour model of dams. Commission internationale des grands barrages. Quinzième congrès des grands barrages, Lausanne 1985, Q.56–R.16.
- [27] Witte, B., und Schmidt, H.: Vermessungskunde und Grundlagen der Statistik für das Bauwesen. Wittwer 1989, Kap. 11.6.
- [28] Kahmen, H.: Le système tachéométrique GEOROBOT à visé automatique, VPK 3/87, S. 99.
- [29] Matthias, H.: Der Roboter-Theodolit Topomat, VPK 8/91, S. 427.
- [30] Emch + Berger Zürich AG, Automatisches Messsystem, Broschüre Emch + Berger 1993.
- [31] Prospekte und Handbücher von Sensoren aller Art, Kataloge und Handbücher zu Computerezubehör, Handbücher zu Telekommunikationssoftware.
- [32] Frei, E.: Rapid Differential Positioning with the Global Positioning System (GPS), Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz, Band 44, Schweizerische Geodätische Kommission, 1991.
- [33] Schwarz, J., Schubernigg, M.: Static, Rapid Static, Stop and Go and Kinematic Measurements on the FGCS Test Network, Maryland, U.S.A., Leica AG, Heerbrugg, Schweiz, 1992.

Schweizerisches Nationalkomitee für grosse Talsperren – Comité national suisse des grands barrages – Swiss national committee on large dams.

Sekretariat c/o Nordostschweizerische Kraftwerke AG (NOK), Parkstrasse 23, CH-5401 Baden, Fax 056/203845.

Arbeitsgruppe Talsperrenbeobachtung c/o Bundesamt für Wasserwirtschaft, Postfach, CH-3001 Bern, Fax 031/61 54 51.