

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
Kapitel: 4: Mesure de déformation à l'aide de satellites = Satellitengestützte Deformationsmessung
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: 02.04.2025

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

méthodes d'exploitation progresseront aussi. On teste déjà de nouveaux modèles mathématiques et les systèmes-experts sont à notre porte.

Mais on doit veiller à ne pas abandonner à ces méthodes automatisées des compétences de décision. Il faut au contraire laisser à l'ingénieur géomètre qualifié le soin d'analyser le résultat de ses mesures, qu'elles soient conventionnelles ou automatisées. C'est lui qui assume la responsabilité de ses résultats, qui participent à la sécurité de nos barrages.

4. Mesure de déformation à l'aide de satellites

Dieter Schneider et Adrian Wiget

4.1 Introduction

Les satellites artificiels sont utilisés depuis plus de 20 ans dans la mensuration pour la détermination de la position des points. Nous disposons aujourd'hui du système de navigation par satellites *Navstar / Global Positioning System (GPS)* [10, 14] du Département américain de la défense, pouvant être utilisé également dans la mensuration technique et industrielle. Un des avantages essentiels de la mensuration par satellites est que l'intervisibilité entre les points du réseau devient caduque. Pour cette raison, le GPS se révèle judicieux pour la surveillance des barrages où la topographie et la forêt empêchent souvent l'extension du réseau. Sans la contrainte d'intervisibilité, nous pouvons choisir avec certitude des points fixes situés en dehors de la zone d'influence du barrage et sur un sol géologiquement stable.

La question essentielle est désormais de savoir si la précision et la fiabilité du GPS sont suffisantes pour l'intégrer dans la surveillance des barrages. La mesure terrestre des déformations permet d'atteindre la précision en position (1 Sigma) de l'ordre de grandeur de 0,3 à 2 mm pour autant que l'on s'appuie sur des points stables. L'exigence pour GPS est ainsi établie.

Divers tests montrent que la précision demandée peut être atteinte avec les précautions nécessaires. Il semble aussi que la solution hybride, c'est-à-dire la combinaison

Aber es sei davor gewarnt, diesen automatisierten und automatischen Verfahren Entscheidungskompetenzen zuzugestehen. Es ist dafür zu sorgen, dass immer – wenigstens bis auf weiteres – der verantwortungsbewusste und qualifizierte Geodät/Ingenieur die kritische Beurteilung seiner konventionellen und automatisierten Bemühungen vornimmt. Er übernimmt ja auch die volle Verantwortung für seine Resultate, die massgeblich zur Sicherheit unserer Stauanlagen beitragen.

4. Satellitengestützte Deformationsmessung

Dr. Dieter Schneider und Adrian Wiget

4.1 Einleitung

Künstliche Erdsatelliten werden seit mehr als 20 Jahren in der Vermessung zur Bestimmung von Lage und Höhe eingesetzt. Mit dem Satelliten-Navigationssystem *Navstar / Global Positioning System (GPS)* [10, 14] des U.S. Verteidigungsdepartements steht heute ein System zur Verfügung, das auch in der Ingenieurvermessung eingesetzt werden kann. Einer der Hauptvorteile der satellitengestützten Vermessung ist, dass zwischen den Punkten des Messnetzes keine Sichtverbindung benötigt wird. Genau deshalb ist GPS geeignet, in der Talsperrenüberwachung eingesetzt zu werden, denn oft begrenzen die Topographie oder vorhandene Wälder die Ausdehnung des Messnetzes. Ist man nicht auf Sichtverbindungen angewiesen, können die Festpunkte so gewählt werden, dass sie mit Sicherheit ausserhalb des Einflussbereichs der Stauhaltung und auf stabilem geologischem Untergrund liegen.

Die Kernfrage ist nun, ob die erreichbare Genauigkeit und Zuverlässigkeit ausreicht, um GPS in die Talsperrenüberwachung zu integrieren. In diesem Zusammenhang gilt es zu beachten, dass die terrestrische Verformungsmessung, wenn sie sich auf stabile Festpunkte abstützen kann, Lagegenauigkeiten (1 Sigma) in der Grössenordnung von 0,3 bis 2 mm erreicht. Damit ist die Anforderung an GPS festgelegt.

Verschiedene Testversuche zeigen, dass die vorstehende Zielvorgabe erfüllt werden kann, wenn angemessen gearbeitet wird. Es scheint auch, dass die hybride Lösung, d.h. die Kombination zwischen satellitengestützter und terrestrischer Deformationsmessung, die zweckmässigste Lösung darstellt.

Das Bundesamt für Landestopographie (L+T) begann bereits Mitte der achtziger Jahre mit Tests und praktischen Anwendungen der satellitengestützten Vermessung mit Hilfe von GPS. Anlässlich der Netzerweiterungen 1989 der geodätischen Überwachungsnetze der Staumauern in den Schlagen (Etzelwerke) und Schiffenen (Entreprises Electriques Fribourgeoises, EEF) hat die L+T in Zusammenarbeit mit den Kraftwerken und den verantwortlichen Experten die satellitengestützte Messmethode erstmals in der Schweiz für die Überwachung von Stauanlagen eingesetzt [17]. Dabei wurden die bisherigen terrestrischen Messungen aber nicht ersetzt, sondern durch GPS-Messungen ergänzt. In der Zwischenzeit liegen im Netz Schiffenen bereits Resultate von mehreren Wiederholungsmessungen über drei Jahre vor, welche eine Beurteilung der Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Anwendung erlauben. In den folgenden Jahren hat die L+T auch in den Überwachungsnetzen Montsalvens und Rossens (beide EEF) sowie Griessee und Lago del Naret (beide Maggia Kraftwerke AG) Erweiterungen mit GPS erfolg-

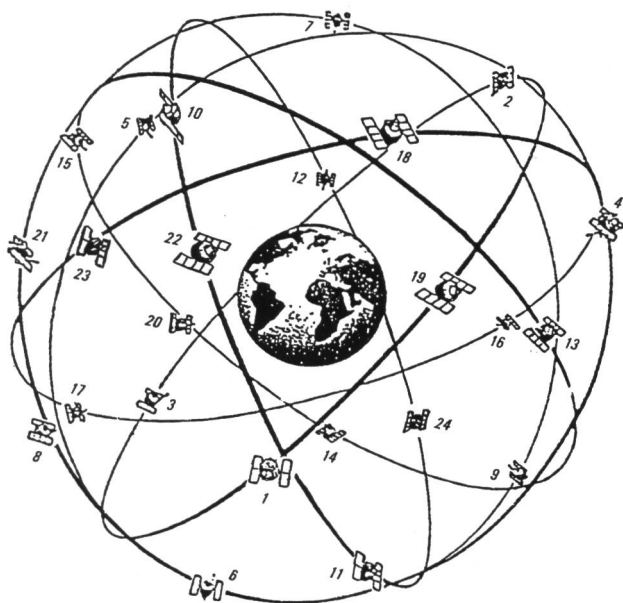


Figure 4.1. Constellation des satellites GPS (achèvement 1993).
Bild 4.1. Konstellation der GPS-Satelliten (Endausbau 1993).

entre la méthode GPS et la mesure de déformation terrestre, présente la solution la plus opportune.

L'Office fédéral de topographie (S+T) a commencé les tests et les applications pratiques de la mensuration avec satellites au milieu des années 80 avec la méthode GPS. Pour la première fois en Suisse, le S+T a utilisé cette dernière en 1989 dans le cadre de l'agrandissement des réseaux des barrages In den Schlagen (Etzelwerke) et Schiffenen (Entreprises Electriques Fribourgeoises, EEF), ceci en collaboration avec les forces motrices et les experts responsables [17]. Les mesures terrestres actuelles ne sont toutefois pas remplacées mais complétées par les mesures GPS. D'ailleurs, les résultats de plusieurs mesures de répétition sur trois ans du réseau Schiffenen permettent de juger la précision et la fiabilité de cette application. Le S+T a en outre ces dernières années mené à bonne fin la conception des réseaux de surveillance de Montsalvens et Rossens (tous deux EEF) ainsi que Griessee et Lago del Naret (tous deux Forces Motrices Maggia SA); ces derniers avec la participation du bureau d'ingénieurs Meier de Minusio. Le bureau Meier a mesuré à nouveau en 1992 les réseaux Griessee et Naret [12] et aussi étendu les réseaux des barrages Cavagnoli et Robiei par les mesures GPS.

4.2 Mensuration exacte avec GPS

4.2.1 Le système de positionnement global (GPS)

Le Département américain de la défense (DoD) développe depuis les années 70 le système militaire de navigation par satellites NAVSTAR/GPS. Ce système doit avant tout résoudre les problèmes de navigation des forces armées américaines. Il peut s'appliquer aussi à la navigation civile et aux problèmes liés à la mensuration. Actuellement en plein développement, il sera achevé vers la fin 1993 avec une constellation de 21 satellites ainsi que 3 satellites de réserve. Les orbites des satellites sont presque circulaires avec un rayon d'environ 26 500 km. Les satellites sont répartis sur 6 orbites (image 4.1) de telle sorte que depuis chaque point de la surface de la terre – sauf obstacles topographiques – des observations simultanées sur 4 satellites puissent être faites. On obtient ainsi, en plus de la grande précision et de la fiabilité, une rentabilité accrue des mesures.

Les satellites GPS émettent des signaux sur deux fréquences porteuses dans la gamme des micro-ondes ($L_1 = 1,6 \text{ GHz}$, $\lambda_1 = 19 \text{ cm}$; $L_2 = 1,2 \text{ GHz}$, $\lambda_2 = 24 \text{ cm}$). Sur les ondes porteuses sont modulés deux codes différents (Code C/A, Code P). Les signaux transmettent aussi les paramètres des orbites (éphémérides) et les paramètres d'horloge des satellites. Le code C/A (seulement sur L_1) reste constamment à disposition de chaque utilisateur alors que le code P (sur L_1 et L_2), encore accessible, ne sera plus connu à l'achèvement du système que par les usagers agréés. L'accès ne sera pas possible aux utilisateurs civils. Cependant, cette restriction n'aura pas d'influence négative sur la précision du positionnement relatif.

Les récepteurs GPS modernes enregistrent les signaux codés de tous les satellites GPS «visibles» simultanément. Les récepteurs mesurent le temps de parcours du signal depuis les satellites jusqu'à l'antenne réceptrice et déterminent les distances spatiales entre celle-ci et les satellites (image 4.2). Les mesures vers plusieurs satellites permettent le calcul d'une position approchée absolue de l'emplacement des antennes et aussi la synchronisation de l'horloge des récepteurs avec le temps de réf-

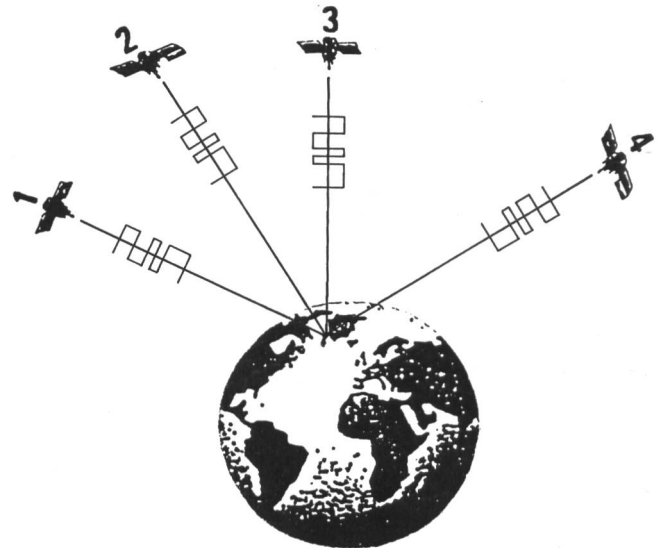


Figure 4.2. Positionnement absolu avec GPS.

Bild 4.2. Absolute Positionierung mit GPS.

reich durchgeführt, die beiden letzteren in Zusammenarbeit mit dem Ingenieurbüro Meier, Minusio. 1992 hat das Büro Meier die Netze Griessee und Naret in eigener Regie nachgemessen [12] sowie diejenigen der Staumauern Cavagnoli und Robiei für GPS-Messungen erweitert.

4.2 Genaue Vermessung mit GPS

4.2.1 Das Global Positioning System (GPS)

Das U.S. Verteidigungsdepartement (DoD) entwickelt seit den siebziger Jahren das militärische Satelliten-Navigationssystem Navstar/GPS. Das System soll primär die Navigationsaufgaben der amerikanischen Streitkräfte erfüllen. Es kann jedoch auch für zivile Navigations- und Vermessungsaufgaben verwendet werden. Das System wird zurzeit rasch ausgebaut und wird im Endausbau (ab etwa Ende 1993) aus einer Konstellation von 21 Satelliten (plus 3 aktiven Reserven) bestehen. Die Satellitenbahnen sind fast kreisförmig mit Radien von etwa 26 500 km. Die Satelliten werden so auf 6 Bahnebenen verteilt sein (Bild 4.1), dass (mit Ausnahme bei Abschattung durch topographische Hindernisse) jederzeit von jedem Punkt der Erdoberfläche gleichzeitig 4 Satelliten beobachtet werden können. Damit kann neben einer hohen Genauigkeit und Zuverlässigkeit auch eine hohe Wirtschaftlichkeit der Messungen erreicht werden.

Die GPS-Satelliten senden auf zwei Trägerfrequenzen im Mikrowellenbereich ($L_1 = 1,6 \text{ GHz}$, $\lambda_1 = 19 \text{ cm}$; $L_2 = 1,2 \text{ GHz}$, $\lambda_2 = 24 \text{ cm}$) Signale aus. Den Trägerwellen sind zwei verschiedene Codes (C/A-Code, P-Code) aufmoduliert. Die Signale übermitteln zudem auch die Bahn- (sog. Ephemeriden) und Uhrdaten der Satelliten. Der C/A-Code (nur auf L_1) steht allen Benutzern jederzeit zur Verfügung, während der P-Code (auf L_1 und L_2), heute an Werktagen noch allgemein zugänglich, nach dem Endausbau des Systems nur noch autorisierten Anwendern bekanntgegeben wird und zivilen Benutzern versperrt sein wird. Für die relative Positionierung wird dies jedoch kaum negative Einflüsse auf die Genauigkeit haben.

Moderne GPS-Empfänger empfangen die codierten Signale von allen gleichzeitig «sichtbaren» GPS-Satelliten. Die Empfänger messen die Laufzeiten der Signale von den Satelliten bis zur Empfangsantenne und bestim-

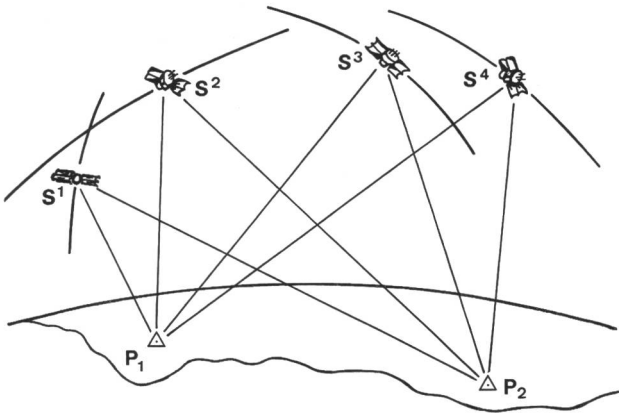


Figure 4.3. Positionnement relatif de différentes stations à l'aide de différences de phase des ondes porteuses GPS de plusieurs satellites.

Bild 4.3. Relative Positionierung mit Phasendifferenzen der GPS-Trägerwellen verschiedener Satelliten von verschiedenen Stationen.

rence des satellites. Le système de référence géodésique global World Geodetic System WGS-84 sert de base à toutes les mesures et calculs GPS.

4.2.2 Positionnement relatif de haute précision avec GPS

Comme grandeur observée pour le positionnement relatif, les récepteurs géodésiques mesurent les phases des ondes porteuses L1 et L2 à des instants bien définis. La résolution des mesures de phase est de 1 à 2 mm. Après un même intervalle de mesure avec plusieurs récepteurs sur des stations éloignées l'une de l'autre, les mesures de phase enregistrées simultanément seront transférées sur PC en vue de leur exploitation. Les différences entre les mesures de phase simultanées de deux récepteurs sont formées, à partir desquelles sont déduites les différences de distances aux positions connues des satellites. La mesure de phase étant sans équivoque à l'intérieur d'une seule longueur d'onde, on doit estimer, par une compensation supplémentaire sur toutes les mesures d'une station, le nombre inconnu des longueurs d'onde porteuse entières, c'est-à-dire l'ambiguïté vers chaque satellite. A partir des différences de phase et du nombre de longueurs d'onde entières, on déterminera finalement le vecteur tridimensionnel entre les points de station.

Lors de l'utilisation GPS dans des réseaux-tests terrestres de haute précision, on peut démontrer que la méthode est judicieuse et rationnelle pour mener à bien des mesures de précision dans de petits secteurs [13]. En effet, on atteint 1 à 2 mm d'erreur moyenne pour les coordonnées relatives d'un réseau de 5 × 5 km lorsqu'on utilise un logiciel d'exploitation performant. L'erreur moyenne d'une dénivelée est cependant 2 à 3 fois plus élevée à cause des effets de variation de la réfraction troposphérique.

4.3 Principe des réseaux de surveillance des barrages; projet de canevas

La liaison visuelle entre les points n'est pas nécessaire avec le GPS. Celui-ci offre une méthode élégante pour intégrer au réseau de contrôle, hors de la zone de déformation, des points géologiquement stables et surveiller à long terme les déplacements dans la région du barrage. Le rattachement à des réseaux géodésiques existants peut être mesuré avec la méthode terrestre conventionnelle ou GPS, les deux réseaux devant se contrôler mu-

men daraus die Raumdistanzen zu den Satelliten (Bild 4.2). Die Messungen zu mehreren Satelliten dienen der Berechnung einer absoluten Näherungsposition des Antennenstandortes und vor allem der Synchronisation der Empfängeruhr mit der übergeordneten GPS-Referenzzeit der Satelliten. Als Koordinatensystem liegt bei GPS allen Messungen und Berechnungen das geodätische Welt-system World Geodetic System WGS-84 zugrunde.

4.2.2 Relative Positionierung hoher Genauigkeit mit GPS

Als eigentliche Beobachtungsgrösse für die relative Positionierung messen die geodätischen Empfänger die Phasen der L1- und L2-Trägerwellen zu genau definierten Zeitpunkten. Die Messauflösung der Phasemessungen beträgt 1 bis 2 mm. Nach der gleichzeitigen Messung mit mehreren Geräten auf voneinander entfernten Stationspunkten werden die simultan registrierten Phasemessungen zur Auswertung auf einen PC übertragen. Dabei werden Differenzen zwischen den simultanen Phasemessungen von Gerätepaaren gebildet und daraus Distanzdifferenzen zu den bekannten Satellitenstandorten ermittelt. Da die Phasemessung nur innerhalb einer Wellenlänge eindeutig ist, muss in einer nachträglichen Ausgleichung über alle Messungen einer Stationierung noch die unbekannte Anzahl der ganzen Trägerwellen, die sog. Phasemehrdeutigkeit (meist auch engl. ambiguity genannt), zu den einzelnen Satelliten geschätzt werden. Aus den Phasendifferenzen und der Anzahl der ganzen Wellen werden schliesslich die Raumvektoren zwischen den Stationspunkten ermittelt.

Bei der Anwendung von GPS in hochpräzisen terrestrischen Testnetzen konnte gezeigt werden, dass die Methode durchaus dazu geeignet ist, Präzisionsvermessungen in kleinen Gebieten rationell durchzuführen [13]. Wird zudem hochentwickelte Auswertesoftware verwendet, so lassen sich in Kleinnetzen (5 × 5 km) mittlere Fehler von 1 bis 2 mm an den relativen Lagekoordinaten erreichen. Der mittlere Fehler der Höhenunterschiede ist je nach Grösse der troposphärischen Refraktionseffekte zwei- bis dreimal grösser.

4.3 Einsatzkonzept in Talsperren-Überwachungsnetzen; Netzentwurf

Bekanntlich sind mit GPS keine direkten Sichtverbindungen zwischen den zu vermessenden Punkten notwendig. Damit bietet GPS eine elegante Methode, um ausserhalb der Deformationszone versicherte, geologisch stabile Punkte in die Kontrollnetze einzubeziehen und Langzeitverschiebungen im Gebiet der Staumauer in Lage und Höhe überwachen zu können. Der Bezug zu bereits existierenden geodätischen Netzen kann mit konventionellen terrestrischen Methoden oder mittels GPS hergestellt werden, wobei sich die Netze gegenseitig stützen und kontrollieren sollen. Unter Umständen ist die bestehende Netzanlage neu zu überdenken. Meist ist eine Kombination der modernen geodätischen Messmittel angezeigt («hybride 3D-Netze»), bei der die Vorteile der jeweiligen Methoden optimal ausgenutzt werden: Bestimmung von Mauerdeformationen und Lageverschiebungen mittels Präzisions-Distanzmessungen, Richtungs- und Höhenwinkelmessungen, eine hohe relative Höhengenaugigkeit mit dem Präzisionsnivellement und schliesslich eine hohe relative Lagegenaugigkeit auch zwischen weit entfernten Punkten ohne Sichtverbindung mit GPS. Als weitere Vorteile von GPS sind die weitgehende Unabhängigkeit von Tages- und Jahreszeit sowie vom Wetter zu

tuellement. Dans certains cas, le réseau conventionnel doit être revu. La combinaison de mesures géodésiques terrestres et GPS (réseau hybride 3D) est recommandée et permet de tirer profit au maximum des avantages de chaque méthode: détermination des déformations du mur et des déplacements au moyen de distances précises, d'angles horizontaux et verticaux; une précision relative altimétrique élevée avec le nivellement de précision, et finalement une précision relative élevée pour les repères les plus éloignés sans liaisons directes, par la méthode GPS. Cette dernière présentant encore l'avantage d'être opérationnelle en tout temps, jour et nuit, et en toute saison. Elle convient en outre pour mener rapidement à bien les mesures d'un réseau de contrôle partout où les conditions et les situations sont défavorables pour les mesures terrestres.

La partie GPS d'un tel réseau hybride en 3D est construite de façon que le réseau de déformation proprement dit du barrage puisse reposer sur un nombre suffisant de points de contrôle GPS (4 au minimum). Le choix des stations GPS est défini avant tout par des critères de stabilité géologique et tectonique ainsi que de sécurité. Les points sont matérialisés durablement comme tous les points fixes et repérés excentriquement. Les conditions géologiques locales devront être documentées. Les points devront aussi être accessibles facilement toute l'année (danger d'avalanche).

Le lieu choisi doit répondre aux exigences minimales du GPS. Pour obtenir une grande précision, il faut que l'horizon

erwähnen. Damit ist GPS geeignet, in Ausnahmesituationen auch bei Bedingungen, die für terrestrische Messungen ungünstig sind, rasch minimale Kontrollmessungen durchführen zu können.

Der GPS-Netzteil eines solchen hybriden 3D-Netzes ist so anzulegen, dass das eigentliche Staumauer-Deformationsnetz durch genügend (mindestens vier) GPS-Kontrollpunkte umschlossen wird und darin gelagert werden kann. Die Auswahl der Standorte der GPS-Stationen richtet sich vor allem nach den Kriterien der (geologischen und tektonischen) Stabilität und der Sicherheit. Die Punkte sind wie alle Festpunkte dauerhaft zu materialisieren und exzentrisch rückzuversichern. Die örtlichen geologischen Verhältnisse sollten erfasst und dokumentiert werden. Der Zugang zu den Punkten soll möglichst einfach und ganzjährig möglich sein (Lawengefahr).

Daneben hat der Standort aber auch minimalen Anforderungen seitens GPS zu genügen. Um hohe Genauigkeiten zu erreichen, ist darauf zu achten, dass der Horizont ab einer Elevation von ca. 15° bis 20° frei ist, damit weder durch lokale Objekte (Gebäude, Bäume) noch topographische Hindernisse Satelliten abgeschattet werden und auf allen Stationen die gleiche Satellitenkonstellation verfügbar ist. Da die Wellenausbreitung im Frequenzbereich von GPS mit derjenigen des Lichtes vergleichbar ist, können auch Bäume die GPS-Signale teilweise oder ganz abschatten. Deshalb sind GPS-Messungen in lichten Wäldern zwar möglich, für Präzisionsanwendungen sollten sie aber vermieden werden. Im weiteren sind die Statio-

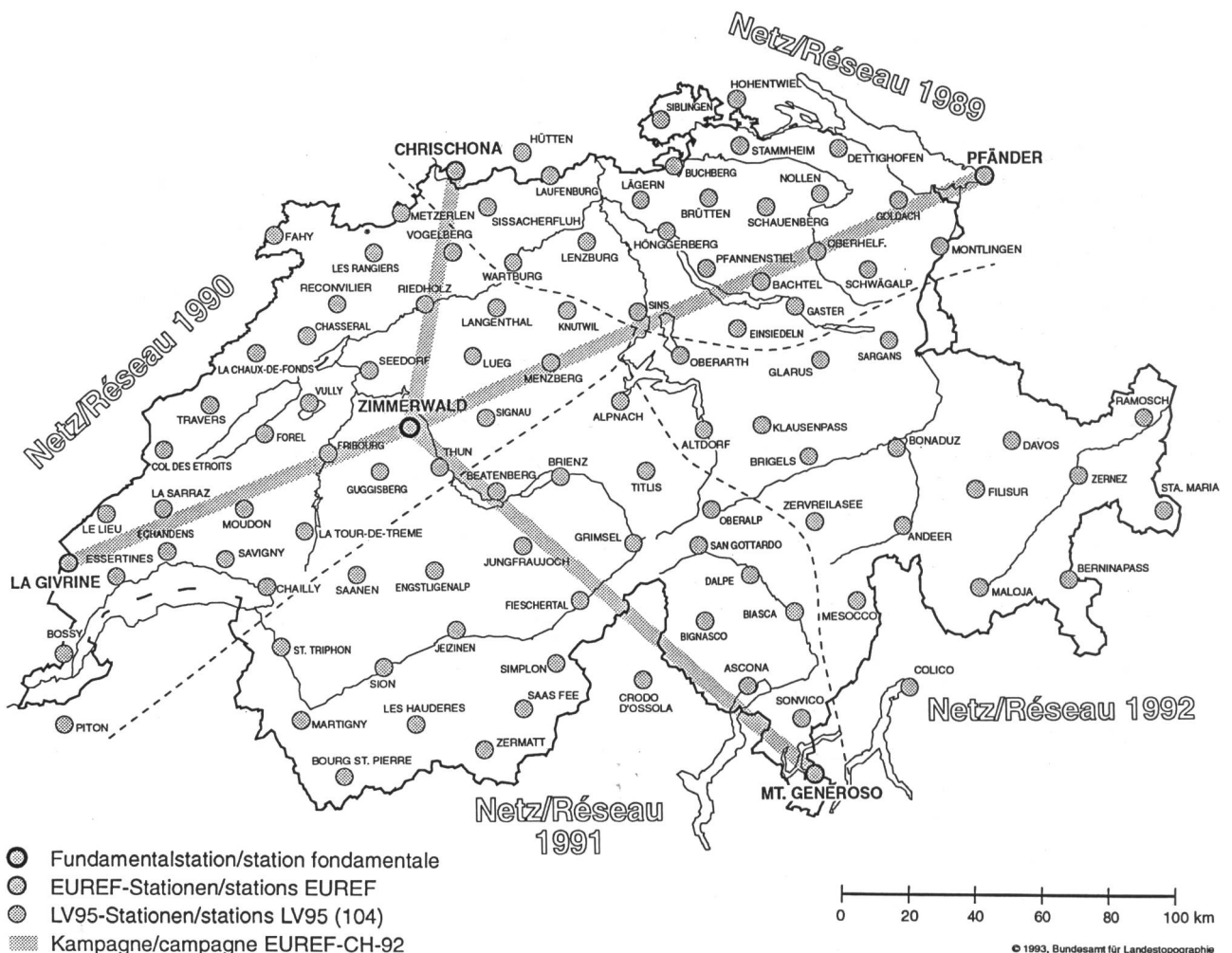


Figure 4.4. Points de référence GPS dans la nouvelle mensuration fédérale LV95.

Bild 4.4. GPS-Referenzpunkte in der neuen Landesvermessung LV95.

zon soit libre à partir d'une élévation d'environ 15° à 20°, que les objets locaux (maisons, arbres) et les obstacles topographiques ne perturbent pas la liaison avec les satellites et que toutes les stations disposent de la même constellation de satellites. Les arbres peuvent aussi interrompre entièrement ou en partie les signaux GPS car la propagation des ondes GPS est comparable dans la gamme de fréquence à celle de la lumière. Les mesures GPS sont toutefois possibles dans les forêts dégagées, mais devraient être exclues pour des applications précises. De plus, les stations devraient être installées à plus de 300 m d'un émetteur pour que ses signaux n'interfèrent ni ne perturbent les signaux GPS. Aucune surface réfléchissante (toit en tôle) pour les micro-ondes ne doit se trouver à proximité d'une station GPS, car ceci pourrait provoquer des réflexions des signaux.

Toutes ces contraintes sont pourtant moins restrictives que les liaisons directes des méthodes conventionnelles et laissent une plus grande liberté pour le choix des stations. Comme il a déjà été mentionné, les réseaux hybrides offrent la meilleure solution dans la pratique. Il est toutefois avantageux que les deux parties du réseau puissent être combinées par des mesures classiques permettant un rattachement optimal du réseau terrestre. Les mesures de distances entre les points GPS servent aussi à déterminer l'échelle du réseau trigonométrique. Des exemples figurent dans l'annexe n° 4 des barrages Montsalvens et Rossens avec les mesures de rattachement terrestres, y c. les visées d'orientation. Par contre, les réseaux de mesures de déformation des barrages ne sont pas reportés.

4.4 Planification et réalisation des mesures GPS

4.4.1 Préparation et organisation des mesures

En plus de la densité et du choix des points du réseau, différents paramètres qui doivent être encore pris en considération pour la planification des campagnes GPS, comme par exemple la précision, le nombre et le type de récepteurs, la configuration des satellites, le programme d'observation, les points fixes de coordonnées connues, la logistique (véhicules, liaisons radio, etc.).

Une des règles principales à observer pour la planification des mesures est de mesurer et restituer des lignes de base aussi courtes que possible car la part d'erreur dépendant de la distance, également pour GPS, prédomine au-dessus de 1 km. De plus, pour les stations calculées ensemble, la constellation de satellites visibles simultanément devrait être optimale. Pour les durées de mesure de 1 à 2 heures, il faut prêter attention à la répartition des satellites sur tout l'hémisphère. Les points devront être stationnés au moins deux fois avec centrage forcé et les hauteurs d'antennes déterminées plusieurs fois de manière indépendante, lorsqu'elles ne sont pas clairement définies par le centrage forcé.

4.4.2 Récepteurs et antennes

Pour éviter le plus possible une erreur d'échelle, les récepteurs géodésiques à deux fréquences, avec une haute résolution de la mesure des phases, sont absolument recommandés pour les applications de précision. Une attention particulière doit être apportée au choix des antennes et à leur calibration. Pour la mesure de petits réseaux, seuls des récepteurs et des antennes de même type devront être utilisés de manière à diminuer l'influence des

nen mindestens 300 m von Sendern entfernt einzurichten, deren Signale mit denjenigen von GPS interferieren und letztere dadurch stören könnten. In unmittelbarer Nähe der GPS-Stationen sollten keine für Mikrowellen reflektierenden Flächen (z. B. Blechdächer) sein, welche Mehrwegausbreitungen der Signale verursachen könnten.

All diese Einschränkungen sind jedoch meist weniger restriktiv als die notwendigen Sichtverbindungen bei konventionellen Methoden und lassen bezüglich der Standortwahl eine grössere Freiheit offen. Da in der Praxis, wie bereits erwähnt, hybride Netze meist die beste Lösung darstellen, ist es vorteilhaft, wenn zu anderen Punkten des Netzes terrestrische Anschlussmessungen möglich sind, damit beide Netzteile kombiniert und der terrestrische Netzteil optimal gelagert werden kann. Distanzmessungen zwischen GPS-Punkten dienen daneben auch der Massstabsbestimmung im trigonometrischen Netzteil. Als Beispiele sind im Anhang Nr. 4 die GPS-Netze der Staumauern Montsalvens und Rossens mit den terrestrischen Anschlussmessungen (inkl. Orientierungsvisuren) dargestellt. Die eigentlichen Deformationsnetze im Bereich der Staumauern sind nicht eingetragenen.

4.4 Planung und Durchführung der GPS-Messungen

4.4.1 Vorbereitung und Messplan

Neben der Punktdichte und -auswahl bleiben noch verschiedene Parameter, welche bei der Planung von GPS-Kampagnen berücksichtigt werden müssen, wie z. B.: Genauigkeit, Anzahl und Typ der Empfänger, Satellitenkonfiguration, Beobachtungsprogramm, Festpunkte mit bekannten Koordinaten, Logistik (Fahrzeuge, allfällige Funkverbindungen usw.).

Als einer der Grundsätze bei der Messplanung ist darauf zu achten, dass möglichst kurze Strecken (sog. Basislinien) gemessen und ausgewertet werden, da auch bei GPS der distanzabhängige Fehleranteil ab ca. 1 km überwiegt. Im weiteren soll die simultane Satellitensichtbarkeit auf gemeinsam auszuwertenden Stationen maximiert werden. Vor allem bei kurzen Messzeiten (1 bis 2 Std.) ist auf eine gute, über die ganze Hemisphäre verteilte Satellitengeometrie zu achten. Die Punkte sollten zwangszentriert mindestens zweimal stationiert werden und die Antennenhöhen müssen, falls sie nicht durch die Zwangszentrierung eindeutig vorgegeben sind, mehrmals unabhängig bestimmt werden.

4.4.2 Empfänger und Antennen

Für Präzisionsanwendungen von GPS sind geodätische Zweifrequenzenempfänger mit hoher Auflösung der Phasenmessung empfehlenswert, damit Massstabsfehler möglichst vermieden werden können. Besondere Beachtung ist der Auswahl der Antennen und ihrer Kalibrierung zu schenken. Um den Einfluss von systematischen Fehlern zu verringern (vgl. 4.4.3), sollten in kleinen Netzen pro Messkampagne nur Empfänger und Antennen des gleichen Typs verwendet werden. Da jedoch selbst baugleiche Antennen individuelle Restfehler (Abstand des elektronischen Phasenzentrums vom mechanisch definierten Zentrum der Antenne in Lage und Höhe) aufweisen können, sind diese pro Empfänger/Antennen-Paar, bezogen auf die spezifisch vorhandene Satellitenkonstellation, in Antennentests zu bestimmen. Bei der Messung ist es wichtig, dass alle Antennen gleich orientiert werden. Moderne Auswertprogramme erlauben schliesslich das Anbringen von individuellen Antennenkorrekturen [15].

erreurs systématiques (voir 4.4.3). Du fait que des antennes d'une même série présentent des erreurs résiduelles individuelles (écarts des centres de phases mécanique et électronique de l'antenne en planimétrie et en altimétrie), celles-ci sont à déterminer pour chaque paire récepteur/antenne par un calibrage des antennes lié à la constellation des satellites existants. Il est important que les antennes soient orientées dans la même direction pendant la mesure. Les programmes de restitution modernes permettent d'apporter des corrections d'antenne individuelles [15].

4.4.3 Prévention et correction des influences d'erreurs systématiques

Grâce avant tout au grand nombre de mesures individuelles GPS, les erreurs de mesures *accidentelles* ne jouent plus un grand rôle dans la restitution GPS. Par contre, les erreurs *systématiques* restent un facteur limitant la précision des réseaux GPS. Lors de la conception du réseau et du programme de mesures, on cherchera à diminuer l'influence des erreurs systématiques. En mensuration, le GPS est employé comme méthode de mesure relative (restitution par paires des mesures de phase), et on aspire le plus possible aux mêmes conditions sur toutes les stations. Par contre, la variation des conditions de mesure est souhaitable pour la compensation des influences systématiques pendant les mesures. En principe, l'heure et la durée de la mesure sont choisies de manière à minimiser les effets systématiques ou au moins cerner leur variation. Les données approchées pour les corrections des influences d'erreurs systématiques figurent dans l'annexe n° 3.

En conclusion, il résulte que des mesures de précision de l'ordre du millimètre avec GPS devront être exécutées deux fois dans des conditions atmosphériques différentes et décalées de quelques heures pour bénéficier d'une autre constellation de satellites. On devrait s'en tenir également à une durée minimale de deux heures avec 5 satellites, même lorsque la résolution de tous les nombres de longueurs d'onde porteuse (ambiguïtés) est déjà possible après quelques minutes (voir 4.2.2 et annexe n° 2).

4.5 Calcul GPS et analyse des résultats

4.5.1 Calculs des mesures GPS

Le calcul des mesures GPS comprend essentiellement l'exploitation par paires de mesures simultanées de phases de signaux GPS, en tenant compte des différents paramètres physiques du modèle, qui seront compensés simultanément avec les coordonnées recherchées, par la méthode des moindres carrés. La qualité du logiciel d'exploitation sera déterminée entre autres par ses possibilités de modélisation, de correction et d'élimination des influences d'erreurs systématiques.

Le fabricant du récepteur géodésique GPS livre également son propre software d'exploitation. L'Office fédéral de topographie utilise le «Berner GPS-Software» de l'Institut astronomique de l'Université de Berne (AIUB) [15] pour la restitution GPS des réseaux de haute précision en mensuration technique et industrielle. Ce programme permet, en estimant simultanément plusieurs paramètres physiques (par exemple les paramètres d'horloge, d'orbites de satellites, de la troposphère et de l'ionosphère), une compensation intégrale mathématiquement rigoureuse de toutes les mesures faites en plusieurs stations et au cours de plusieurs sessions.

Lors de l'exploitation des données GPS, la résolution fiable des ambiguïtés de tous les satellites est une condition essentielle. Les modèles standard pour la correction

4.4.3 Vermeidung und Korrektion von systematischen Fehlereinflüssen

Vor allem dank der grossen Zahl von Einzelmessungen, wie sie bei der GPS-Messung anfallen, spielen *zufällige* Messfehler bei der GPS-Auswertung keine grosse Rolle mehr. Begrenzender Faktor für die Genauigkeit der GPS-Netze sind dagegen die *systematischen* Fehler. Bereits beim Netzaufbau und beim Entwurf des Messprogrammes sollen mögliche systematische Einflüsse minimiert werden. Da GPS in der Vermessung als relative Messmethode eingesetzt wird, d. h. die Phasenmessungen paarweise ausgewertet werden, sind auf allen Stationen möglichst *gleiche* Bedingungen anzustreben. Andererseits sind zur Kompensation von systematischen Einflüssen während der Messungen variierende äussere Voraussetzungen durchaus wünschenswert. Grundsätzlich sollen die Messzeit (Tageszeit) und die Messdauer so angelegt werden, dass systematische Effekte minimiert werden oder zumindest in ihrer Variabilität erfasst werden können. Nähere Angaben zur Korrektion von systematischen Fehlereinflüssen sind im Anhang Nr. 3 gegeben.

Als Schlussfolgerung ergibt sich, dass Präzisionsmessungen im Millimeterbereich mit GPS zweimal bei unterschiedlichen atmosphärischen Bedingungen oder zeitlich mindestens einige Stunden verschoben bei anderer Satellitengeometrie durchgeführt werden sollten. Eine minimale Gesamtmessdauer von zwei Stunden (bei 5 Satelliten) sollte eingehalten werden, auch wenn die Auflösung der ganzen Anzahl Trägerwellen (sog. Phasenmehrdeutigkeiten oder ambiguïtés) bereits nach wenigen Minuten möglich ist (vgl. 4.2.2 und Anhang Nr. 2).

4.5 GPS-Auswertungen und Beurteilung der Resultate

4.5.1 Auswertung der GPS-Messungen

Die Auswertung von GPS-Messungen umfasst im wesentlichen eine paarweise Verarbeitung gleichzeitig erhobener Phasenmessungen an GPS-Signalen unter Berücksichtigung verschiedener physikalischer Modellparameter, welche gemeinsam mit den gesuchten Punktkoordinaten nach der Methode der kleinsten Quadrate ausgeglichen werden. Die Qualität der Auswertungs-Software wird u. a. an den Möglichkeiten zur Modellierung, Korrektion und Elimination von systematischen Fehlereinflüssen gemessen.

Die Herstellerfirmen geodätischer GPS-Empfänger liefern zusammen mit der Ausrüstung auch eigene Software-Pakete für die Auswertung an. Für GPS-Auswertungen in hochgenauen Netzen der Ingenieurvermessung verwendet das Bundesamt für Landestopographie die sog. «Berner GPS-Software» des Astronomischen Instituts der Universität Bern (AIUB) [15]. Diese erlaubt bei gleichzeitigem Schätzen vielseitiger physikalischer Modellparameter (z. B. Empfängeruhr-, Satellitenbahn-, Troposphären- und Ionosphären-Parameter) eine mathematisch strenge Gesamtausgleichung aller Messungen von mehreren Stationen in mehreren Sessions in einem Guss.

Bei der Auswertung von GPS-Daten ist die zuverlässige Auflösung der Phasenmehrdeutigkeiten zu allen Satelliten eine unbedingte Voraussetzung. Zur Korrektion der ionosphärischen und der troposphärischen Refraktion werden in den handelsüblichen Auswertprogrammen Standardmodelle ohne Einbezug der aktuellen örtlichen Verhältnisse verwendet. Diese sind in kleinräumigen Netzen, wie sie bei Staumauerüberwachungen vorkommen,

de la réfraction ionosphérique et troposphérique utilisés par les programmes vendus dans le commerce ne tiennent pas compte des conditions locales réelles. Leur précision est toutefois suffisante pour des réseaux restreints tels que les réseaux de surveillance de barrages (ordre de quelques ppm). Les autres possibilités du «Berner GPS-Software» sont décrites dans l'annexe 3.

Pour le calcul, on prendra comme fixe (planimétrie et altimétrie) un des points dont les coordonnées approchées dans le système WGS-84 sont connues à moins d'un mètre. Comme résultats de l'exploitation GPS, on obtient les coordonnées WGS-84 des points GPS restants, ainsi que leur matrice de covariance. De fausses coordonnées du point fixe provoquent des erreurs systématiques dans l'orientation et l'échelle du réseau GPS. On obtient les coordonnées exactes du point fixe par exemple par le rattachement du réseau GPS au réseau national LV95 (figure 4.4 [11]), ou par la transformation en coordonnées WGS-84 d'un point fixe connu en coordonnées fédérales.

4.5.2 Transformations d'Helmert

Les précisions internes calculées des solutions GPS sont souvent trop optimistes. Les erreurs moyennes formelles indiquées peuvent, selon la durée et les conditions de mesure, être jusqu'à 10 fois trop petites. Ceci avant tout parce que les erreurs systématiques communes ne sont pas décelées dans la compensation.

A la fin des calculs, les séries de coordonnées GPS par session seront normalement comparées entre elles et avec les mesures complémentaires terrestres. Un premier contrôle rapide de la précision obtenue est donné par les transformations à 7 paramètres (transformations de Helmert) entre les diverses solutions GPS par session. Ceci montre les possibilités de répétabilité des solutions GPS au cours d'une ou deux campagnes distinctes. Aussi, les erreurs systématiques communes ne sont pas décelables, surtout entre deux jours consécutifs.

Une autre possibilité de contrôle plus indépendante est donnée par la transformation de Helmert entre les solutions GPS et les coordonnées déterminées uniquement par la méthode classique. Se pose alors le problème des pondérations entre les différents types d'observations. Par exemple, les altitudes déterminées avec les angles verticaux sur de longues distances sont moins précises que les différences d'altitude ellipsoïdiques GPS (voir ci-dessous). Dans les réseaux avec de grandes dénivelées, comme c'est souvent le cas pour les barrages, les altitudes peuvent être fortement corrélées avec les coordonnées et s'influencer mutuellement. Le choix des poids a une grande influence lors des transformations et compensations tridimensionnelles avec de grandes différences de hauteur.

Les coordonnées WGS-84 déterminées par GPS sont indépendantes du champ gravimétrique local. Les altitudes calculées se rapportent à l'ellipsoïde de référence global alors que les altitudes nivelées du réseau terrestre se rapportent au géoïde. Il faut ainsi tenir compte de l'incertitude des ondulations du géoïde lors du passage de l'ellipsoïde sur le géoïde. Ce n'est d'ailleurs qu'en comparant plusieurs époques que l'on peut mettre en évidence les constantes locales.

4.6 Compensation globale des mesures GPS et terrestres

Les transformations d'Helmert sont particulièrement souples pour un petit nombre de points d'ajustage. Mais

im allgemeinen von ausreichender Genauigkeit (ppm-Bereich). Im Anhang Nr. 3 sind die erweiterten Möglichkeiten der Berner GPS-Software beschrieben.

Bei der Auswertung wird einer der Messpunkte, dessen Näherungskordinaten im Satellitenkoordinatensystem WGS-84 auf besser als 1 m genau bekannt sind, in Lage und Höhe festgehalten. Als Resultate der GPS-Auswertung erhält man die Koordinaten der übrigen GPS-Punkte sowie deren Kovarianzmatrix ebenfalls im WGS-84. Falsche Festpunkt-Koordinaten führen zu systematischen Fehlern in der Orientierung und im Massstab des GPS-Netzes. Genaue Festpunkt-Koordinaten erhält man beispielsweise durch den Anschluss des GPS-Netzes an das GPS-Landesnetz LV95 (Bild 4.4, [11]) oder durch Transformation eines Festpunktes mit bekannten Landeskoordinaten ins WGS-84.

4.5.2 Helmert-Transformationen

Die in der Ausgleichung gerechneten inneren Genauigkeiten der GPS-Lösungen sind meist zu optimistisch. Die ausgewiesenen formalen mittleren Fehler können je nach Messdauer und Messbedingungen um bis zu einem Faktor 10 zu klein sein. Dies vor allem, weil gemeinsame systematische Fehler sich in der Ausgleichung nicht bemerkbar machen.

Nach Abschluss der Auswertungen werden die sessionsweisen GPS-Koordinatensätze üblicherweise untereinander und mit den terrestrischen Zusatzmessungen verglichen. Eine erste rasche Kontrollmöglichkeit über die erreichte Genauigkeit bieten 7-Parameter-Ähnlichkeits-Transformationen (Helmert-Transformationen) zwischen verschiedenen GPS-Sessionslösungen. Diese zeigen die Wiederholbarkeit der GPS-Lösungen innerhalb einer Kampagne oder zwischen zwei Kampagnen zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Allerdings sind auch darin gemeinsame systematische Fehler, vor allem zwischen zwei aufeinanderfolgenden Tagen, nicht sichtbar.

Eine unabhängigere Kontrollmöglichkeit bieten Helmert-Transformationen zwischen GPS-Lösungen und den rein terrestrisch bestimmten Koordinaten. Damit stellt sich aber auch das Problem der Gewichtsverhältnisse zwischen den verschiedenen Beobachtungstypen. So sind z.B. die Höhen aus Höhenwinkeln über längere Distanzen ungenauer als mit GPS bestimmte ellipsoidische Höhendifferenzen (siehe unten). In Netzen mit grossen Höhendifferenzen, wie sie bei Staumauern oft vorkommen, können die Höhen stark mit den Lagekoordinaten korreliert sein und sich diese gegenseitig beeinflussen. Der Wahl der Gewichte kommt daher bei 3D-Transformationen und auch bei 3D-Ausgleichungen mit grossen Höhendifferenzen grosse Bedeutung zu.

Die mit GPS bestimmten WGS-84-Koordinaten sind vom lokalen Schwerfeld unabhängig. Die daraus berechneten Höhen beziehen sich auf das globale Referenzellipsoid der Erde, während sich die nivellierten Höhen im terrestrischen Netz auf das Geoid beziehen. Damit kommt beim Übergang vom Ellipsoid auf das Geoid neu die Unsicherheit der sog. Geoidundulationen (Höhe des Geoides über dem Ellipsoid) ins Spiel. Erst bei Vergleichen zwischen mehreren Messepochen fallen diese als ortskonstante Werte heraus.

4.6 Gesamtausgleichung

Helmert-Transformationen sind besonders bei einer kleinen Anzahl von Passpunkten sehr gutmütig. Besonders Fehler an extremen Randpunkten können oft unbemerkt durch die geschätzten Parameter (Rotationen und Mass-

certaines fautes à l'extrême périphérie peuvent souvent être mal prises en compte par les paramètres estimés (rotations et échelles). Pour obtenir une vue d'ensemble réaliste, aussi bien des mesures terrestres que GPS, et pouvoir calculer finalement une solution combinée, les deux séries de données devront être compensées ensemble.

Le programme RAUMTRI (compensation 3D des réseaux locaux dans un système de coordonnées cartésien et géocentrique) [16] rend possible la compensation commune des réseaux terrestres avec les vecteurs GPS, d'après les principes de la géodésie tridimensionnelle. Sur chaque station seront introduits 6 paramètres (3 coordonnées, latitude, longitude et orientation). On peut évaluer encore plusieurs paramètres d'échelle et de réfraction ainsi que 4 paramètres de transformation pour le positionnement d'une série de coordonnées globales GPS par rapport au réseau terrestre. RAUMTRI permet l'introduction des variances et covariances des vecteurs GPS, tout en tenant compte du caractère tridimensionnel des observations terrestres et GPS.

Le programme LTOP est utilisé pour la compensation séparée de la planimétrie et de l'altimétrie dans le système de projection suisse et permet d'exploiter les coordonnées GPS transformées dans ce système de projection. Le modèle mathématique rend possible l'introduction de plusieurs séries de coordonnées de différentes sessions ou de différentes campagnes, où toutefois les corrélations entre les coordonnées GPS ne sont pas prises en considération. En planimétrie, les 2 à 4 paramètres d'une transformation seront évalués pour chaque série de coordonnées, soit deux translations en X et Y, et facultativement une rotation azimutale ainsi qu'une échelle. Les altitudes peuvent être introduites avec une translation commune ou, si souhaité, avec «deux bascules» du plan horizontal par session.

L'annexe n° 4 montre un exemple des résultats d'une compensation globale avec les mesures GPS et terrestres du réseau Montsalvens [17].

Le compte rendu et la documentation concernant les mesures de déformation terrestres et celles en relation avec GPS se trouvent dans le paragraphe 3.6.

4.7 Résumé et perspectives

GPS offre pour la surveillance des barrages de bonnes possibilités de renforcer et d'élargir les anciens et nouveaux réseaux terrestres. Il se prête particulièrement bien à l'insertion de points géologiquement stables situés en dehors de la zone de déformation et donne ainsi un cadre de référence tridimensionnel pour les mesures de déformation proprement dites du réseau de contrôle.

Les expériences ont démontré que l'on peut atteindre aujourd'hui avec GPS des précisions relatives (erreur moyenne) de 1 mm + 0,5 ppm en planimétrie et environ le double en altimétrie, avec des mesures et calculs soignés, dans des réseaux de surveillance locaux. Ces valeurs pourront être encore améliorées dans un proche avenir avec de meilleures constellations de satellites. Une attention toute particulière devra toutefois être apportée à la correction des influences d'erreurs systématiques.

Dans un proche avenir, on pourra s'attendre à d'autres applications du GPS. Par exemple, la mesure continue et automatique, le calcul de la cinématique des barrages ou de zones avec glissement de terrain à l'aide de mesures permanentes.

stab) aufgefangen werden, ohne speziell aufzufallen. Um einen realistischeren Überblick sowohl über die terrestrischen wie die GPS-Messungen zu erhalten und schliesslich eine kombinierte Lösung rechnen zu können, werden beide Datensätze gemeinsam ausgeglichen.

Das Programm RAUMTRI (3D-Ausgleichung lokaler Netze in einem geozentrischen, kartesischen Koordinatensystem) [16] ermöglicht die gemeinsame Ausgleichung von terrestrischen Netzen mit GPS-Vektoren nach dem Konzept der dreidimensionalen Geodäsie. Für jeden Stationspunkt werden 6 Parameter (3 Koordinaten, 2 Lotabweichungskomponenten und 1 Orientierungsunbekannte) eingeführt. Zusätzlich können mehrere Massstabs-, Refraktions- und 4 Transformationsparameter für die Lage eines GPS-Gesamtkoordinatensatzes relativ zum terrestrischen Netz mitgeschätzt werden. RAUMTRI erlaubt die Einführung von Varianzen und Kovarianzen der GPS-Vektoren und ermöglicht die strenge Beachtung des dreidimensionalen Charakters sowohl der terrestrischen wie auch der GPS-Beobachtungen.

Häufiger wird die getrennte Lage- und Höhenausgleichung in der Projektionsebene mit dem Programm LTOP verwendet, welches die Verarbeitung von inschweizerische Projektionssystem transformierten GPS-Koordinaten erlaubt. Das mathematische Modell ermöglicht die Einführung von mehreren Koordinatensätzen aus verschiedenen Sessionen oder aus verschiedenen Kampagnen, wobei jedoch die Korrelationen unter den GPS-Koordinaten nicht berücksichtigt werden. Lage und Höhe werden getrennt ausgeglichen. In der Lage werden jeweils pro Koordinatensatz zwei bis vier Parameter einer ebenen Ähnlichkeitstransformation mitgeschätzt: Zwei Translationen in X- und Y-Richtung und fakultativ eine azimutale Drehung sowie ein Massstab. Die Höhen können mit einem gemeinsamen Offset sowie, falls gewünscht, mit zwei Kippungen pro Session eingeführt werden.

Als Beispiel sind im Anhang Nr. 4 die Resultate einer Gesamtausgleichung mit terrestrischen und GPS-Messungen im Netz Montsalvens [17] gezeigt.

Bezüglich der Berichterstattung und Dokumentation gelten die für die terrestrische Deformationsmessung in Abschnitt 3.6 festgehaltenen Grundsätze analog auch im Zusammenhang mit GPS-Messungen.

4.7 Zusammenfassung und Ausblick

GPS bietet gute Möglichkeiten, um neue terrestrische Talsperren-Überwachungsnetze optimal anzulegen und bestehende zu erweitern und zu verstärken. Es eignet sich besonders, um ausserhalb der Deformationszone versicherte, geologisch stabile Punkte in die Kontrollnetze einzubeziehen und so einen dreidimensionalen Referenzrahmen für die eigentlichen Deformationsmessungen aufzubauen.

Die Erfahrungen haben gezeigt, dass bei sorgfältigen Messungen und Auswertungen mit GPS in lokalen Talsperren-Überwachungsnetzen heute relative Genauigkeiten (mittl. Fehler) von 1 mm + 0,5 ppm in der Lage und etwa das Doppelte in der Höhe erreichbar sind. Mit besseren Satellitenkonstellationen dürften diese Werte in naher Zukunft noch verbessert werden. Dabei ist insbesondere der Vermeidung und Korrektur von systematischen Fehlereinflüssen grosse Aufmerksamkeit zu schenken.

In naher Zukunft sind auch weitere Anwendungen des GPS zu erwarten, wie z.B. die automatische und kontinuierliche Messung und Auswertung der Kinematik von Talsperren oder rutschgefährdeten Geländeabschnitten mit Hilfe von permanenten GPS-Messanlagen.