

Hochpräzise GPS-gestützte Bauwerksmessungen in Echtzeit

P. Andree, G. Wübbena, A. Bagge, M. Schmitz

BAW-Kolloquium
Messwertgestützte Nachweise für Wasserbauwerke
am 17.10.2001 im Kongresszentrum Hannover

1. Vorbemerkungen

Die Auswahl der Meßverfahren bei Inspektionsmessungen an WSV-Bauwerken richtet sich gemäß den *Vorläufigen Bestimmungen für die Vermessungen zur Inspektion von Bauwerken der WSV* (VBVI 1988) nach dem jeweiligen Stand der Technik.

Solche Inspektionsmessungen sind bei Bauwerken notwendig, die zur Gewährleistung ihrer Stand- / Verkehrssicherheit und / oder Funktionsfähigkeit eine *besonders umfassende Kontrolle erfordern*. Zu diesen Bauwerken zählen im Bereich der WSV große Schleusen, Hebewerke, Hochbrücken, Staumauern, Spannbetonbrücken, Gezeitensperrwerke, Molen etc.

Nicht immer halten die in der täglichen Praxis angewendeten Meßverfahren mit den potentiellen Möglichkeiten von Wissenschaft und Technik Schritt.

Das Informationsbedürfnis über das absolute deformative Verhalten von Großbauwerken unter besonderen Lastfällen in kurzen Zeitabschnitten (2 Sekunden bis 15 Minuten) und in Echtzeit ist aus verschiedenen Gründen gewachsen.

Mit geodätischen Messverfahren im klassischen Sinne sind weder Echtzeitergebnisse noch permanente Überwachungen von Deformationen an Schleusen, Dämmen etc. zu erreichen. Die GPS-Technologie hat prinzipiell das Potential, um diese Anforderungen hochfrequent und mit mm-Genauigkeit zeitgleich auf mehreren Bauwerkspunkten zu erfüllen.

In enger Zusammenarbeit zwischen dem Arbeits- und Forschungsbereich Hydrographie der *HAW Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg* und der Firma *Geo++*[®] in Garbsen konnte am Beispiel des Eidersperrwerkes dieses Potential erstmalig nachgewiesen werden. Basierend auf der bereits verfügbaren Multistations-Echtzeit-Software GNNET, die Trägerphasenbeobachtungen von mehreren Empfängern/Messpunkten gleichzeitig zu homogenen Koordinaten mit einer realistischen Varianz-Kovarianz-Schätzung verarbeiten kann, entwickelte *Geo++*[®] hierbei das Produkt GNPOM (Geodetic Navstar Permanent Object Monitoring). Günstige GPS-Sensoren ohne RTK-Option und ohne internen Speicher können verwendet werden, weil das gesamte Processing mit der separaten Software GNPOM auf einer Standard-PC-Hardware erfolgen kann.

Das sog. *Object-Monitoring* wird normalerweise innerhalb eines begrenzten Bauwerksbereiches durchgeführt. Über kurze Entfernungen sind die begrenzenden Faktoren für die Genauigkeit die sogenannten Antennenphasenzentrumsvariationen (**PCV**) und der Einfluss von Mehrwegeausbreitung/Multipath (**MP**). GNPOM nutzt absolut kalibrierte Antennen, so dass durch Antennen-PCV hervorgerufene Fehler unterhalb des Sub-Millimeter-Bereiches bleiben.

Multipath (MP) ist also der wesentliche begrenzende Faktor für präzise Positionierungsaufgaben über kurze Entfernungen mit GPS

2. Reduktion des MP-Effektes

Zwei Verschiedene Ansätze zur Reduktion der MP-Effekte werden erläutert und demonstriert.

Statische oder geringdynamische Modellierung

Der erste ist die MP-Reduktion durch *statische* oder *geringdynamische Modellierung*. Dies kann durch Mittelbildung oder Langzeitfilterung erfolgen. Eine Mittelungszeit von 1 Minute reduziert im wesentlichen das Messrauschen, aber das periodische MP-Signal bleibt klar erhalten. Ein Verlängern der Mittelungszeit auf 30 und 60 Minuten zeigt, dass das MP-Signal jetzt reduziert ist. Für die 60-Minuten-Mittelung erhalten wir verbleibende MP-Fehler in der Größenordnung von einigen Millimetern. Dieser Wert kann weiter reduziert werden durch längere Mittelungszeiten. Abhängig von der Zahl der Satelliten und der *Satellitengeometrie* ist der Effekt des MP im Positionsraum normalerweise kleiner, weil nicht alle Satelliten in derselben Größenordnung beeinflusst sind und eine Reduktion durch redundante Satelliten erreicht wird.

Eine Mittelbildung kann jedoch nur angewendet werden bei statischen Beobachtungen oder wenn das dynamische Modell der erwarteten Bewegungen genügend Zwang auf den Filterprozess ausübt, um so etwas wie einen Mittelungseffekt zu erreichen. Dies bedeutet, dass kinematische Beobachtungen mit erwarteten Bewegungen von Millimetern über kurze Zeiträume nicht vom Vorteil einer Filterung oder einer Mittelbildung profitieren und daher MP nicht eliminieren oder reduzieren können.

Siderischen Tagesdifferenzen

Der zweite Ansatz ist die Verwendung von siderischen Tagesdifferenzen, durch die MP aufgrund der Wiederholung der Geometrie der Satellitenpositionen drastisch reduziert wird.

Für einzelne GPS Satelliten ist der Multipath-Einfluss signifikant korreliert zwischen aufeinander folgenden Tagen, weil die Satellitenkonstellation sich nach einem siderischen Tag (ca. 23 h u. 56 Minuten) wiederholt und daher die Multipath-Geometrie für eine gegebene Stationsumgebung sehr ähnlich ist. Unter Verwendung der Daten vom Vortag ist GNPO in der Lage, Multipath von den Trägerphasenbeobachtungen zu trennen. Weiter limitierende Fehlerquellen wie Bahnfehler, Ionosphäre oder Troposphäre, sind entweder aufgrund kurzer Entfernungen nicht signifikant, oder können eliminiert werden durch Verwendung von mehreren Basisstationen in der GNNET-Multistationsausgleichung. Die so behandelten Beobachtungen sind *frei von systematischen Fehlern*, bei einer Genauigkeit besser als 1 Millimeter.

Kombinierte Methoden

Abhängig von dem zu überwachenden Objekt können die Methoden der Langzeit-Filterung und der MP-Reduktion durch siderische Differenzen kombiniert werden, um Millimeter-Genauigkeit für kleinräumige kinematische Bewegungen im absoluten Sinn zu erhalten.

Wenn zum Beispiel eine Antenne am ersten Tag als statisch angenommen werden kann, so kann die Millimetergenauigkeit der Position durch ein statisches Modell erreicht werden. Wenn kinematische Bewegungen für den zweiten Tag erwartet werden, dann können diese aus den siderischen Differenzen gegenüber dem ersten Tag bestimmt werden. Die bekannte statische Position am ersten Tag dient als eine absolute Referenz für den zweiten Tag, das heißt, in solch einem Szenario können hochgenaue absolute kinematische Positionen bestimmt werden.

Wenn die Charakteristik der Bewegung eines Objekts als eine Funktion von Stellgrößen (z.B. zeitlich exakt erfasste Lastfälle) angenommen werden kann, so können Informationen über diese genutzt werden, um die Parameter des Kalman-Filter zu steuern. Die Bewegung der Wände einer Schleusenkammer werden beispielsweise vom Füllen und Leeren der Schleuse mit Wasser beeinflusst. Nach einer bestimmten Zeit nach einem solchen Prozess wird die Geschwindigkeit der Bewegung abnehmen oder enden. Die Information über den Füll- oder Entleerungsprozess kann benutzt werden, um die Filterparameter vom statischen oder sehr langsamen Bewegungen auf schnellere Bewegungen während des Prozesses umzuschalten. In solch

einer Situation kann die Reduktion von Multipath durch Filterung und Siderische Differenzen optimal für maximale Genauigkeit der absoluten Bewegungen der Objektpunkte kombiniert werden.

3. Systemkonfiguration

Das Potential dieser neuen Technologie wurde im Auftrag der Bundesanstalt für Wasserbau exemplarisch am Beispiel von Deformationsmessungen an der Schleuse Uelzen I untersucht.

Dabei standen im Mittelpunkt des Untersuchungsauftrages speziell die durch Last und/oder Zwang auftretenden kurzzeitigen Deformationen sowie Zeit, Häufigkeit und Reproduzierbarkeit solcher Messungen und Ergebnisse mit mm-Genauigkeit.

In Absprache mit der BAW wurden 3 Messquerschnitte (Haupterblock Unterhaupt, Kammerblock 1, Kammerblock 6 in Schleusenmitte) mit jeweils 2 Messpunkten sowie räumlich abgesetzt eine Referenzstation eingerichtet. Die 6 Messpunkte auf den beiden Kammerwänden wurden mit speziellen, neu konstruierten Mobilpfeilern und Antennen ausgerüstet, um möglichst viele Satelliten empfangen zu können. Auf der Referenzstation wurde ein vorhandener Betonpfeiler des WSA Uelzen genutzt.

Die GPS-Empfänger einschließlich Stromversorgung und Kommunikationsgeräte wurden auf der Ost- und Westseite jeweils in einer einzelnen Zarges-Kiste auf den Kammerwänden untergebracht (Abb. 1). Alle GPS-Empfänger waren bidirektional über Media-Konverter und Glasfaserkabel mit der redundant ausgerüsteten PC-Zentrale im Steuerstand der Schleuse verbunden. Die Kiste auf der Ostseite diente zusätzlich als Relais-Station für die Referenzstation, deren Daten komprimiert über 2m-Band-Funk übertragen und dann auf seriell und anschließend auf TCP/IP umgesetzt wurden.

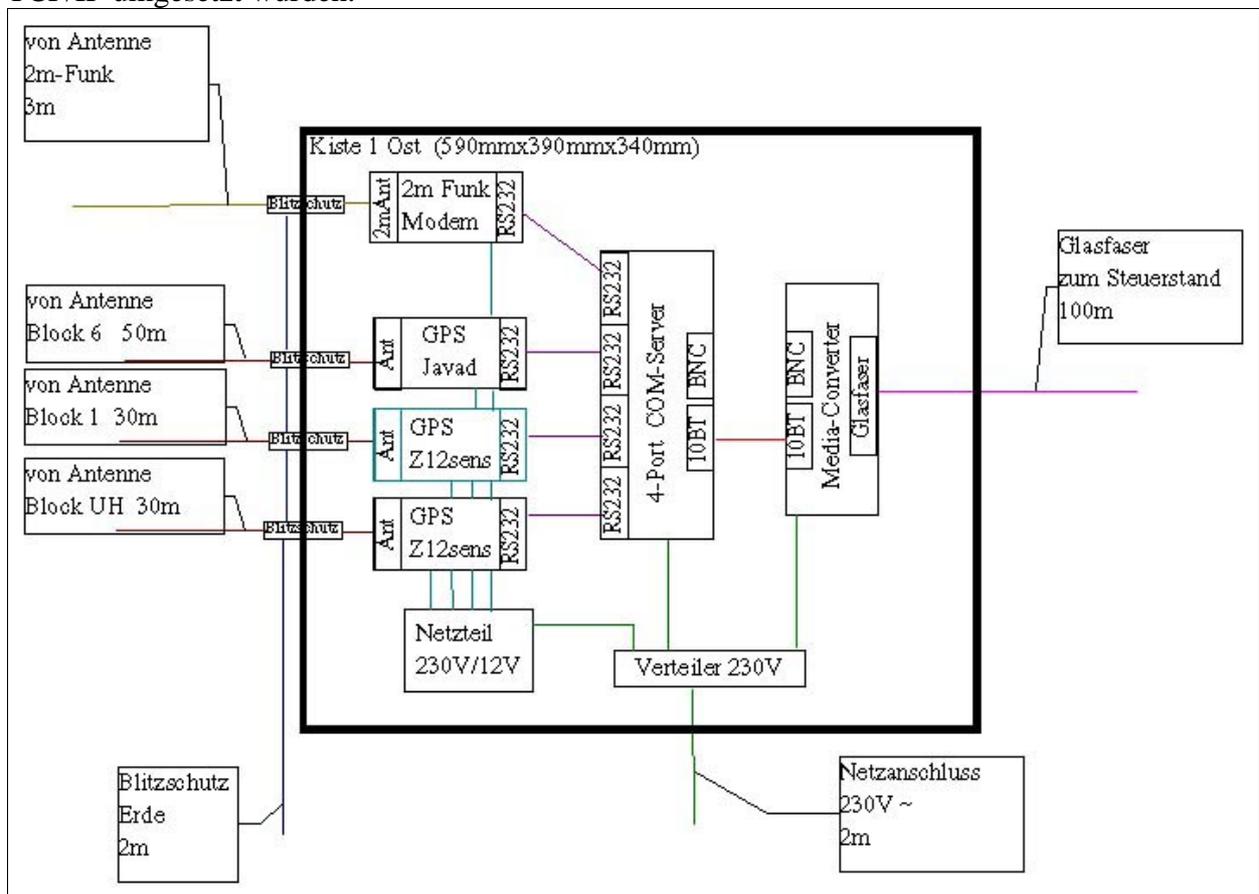


Abbildung 1: Gerätekonfiguration Ostseite

Über Modem und Telefonanschluss konnten die in der Zentrale sekundlich anfallenden Ergebnisse/Deformationen fernüberwacht werden. Die Messungen fanden vom 10.01.–10.02.2001 mit einem zur Systemoptimierung vorangehenden 3-wöchigen Probelauf statt.

4. Ergebnisse

Die Datenanalyse wurde auf vielfältige Weise durchgeführt. Ergebnisse können hier nur an wenigen Abbildungen auszugsweise dargestellt werden.

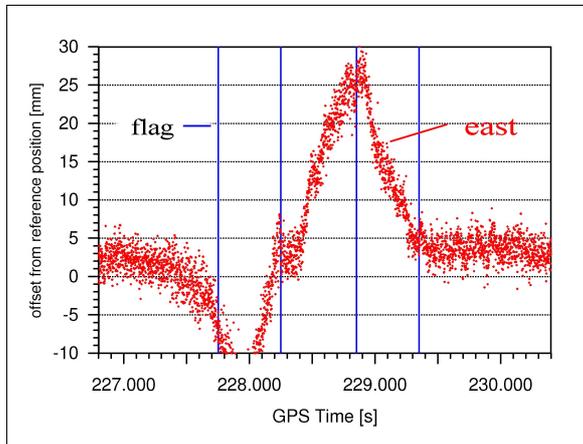


Abbildung 2: Ungefilterte siderische Ost-Differenzen einer Schleusung, Pfeiler Block 6 Ost, Tag 015p kombiniert mit Tag 016p

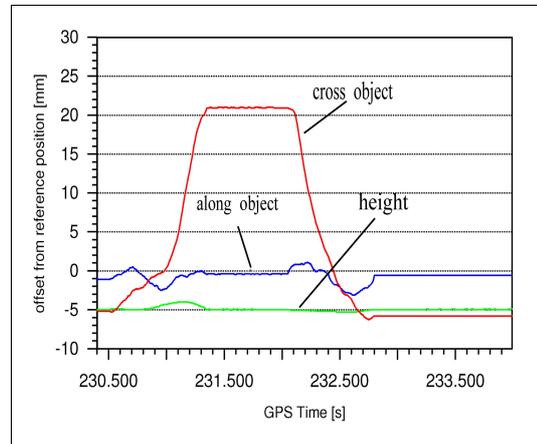


Abbildung 3: Endgültige gefilterte Ergebnisse für einen Schleusungsvorgang in Längs-, Quer- und Höhenkomponente, Pfeiler Block 6 Ost, Tag 016q

Die Abbildung 2 stellt die siderischen Tagesdifferenzen für den Spezialfall dar, daß an beiden Tagen überlappende Schleusungsvorgänge auftraten. Eine eindeutige Interpretation war wegen fehlender Stellgrößen (Flags) schwierig. Mit Hilfe der Echtzeit- und der Postprocessing-Version von GNPOM gelang es, die individuellen Schleusungsvorgänge zu unterscheiden.

Abbildung 3 zeigt das endgültige Ergebnis für einen Schleusungsdurchgang (Füllung, Entleerung) und einen der Objektpunkte. Die größte Variation in der Höhe beträgt 1 mm. Da die Höhe als stabil erwartet werden kann, erhält man einen Eindruck von der absoluten Genauigkeit des Messverfahrens.

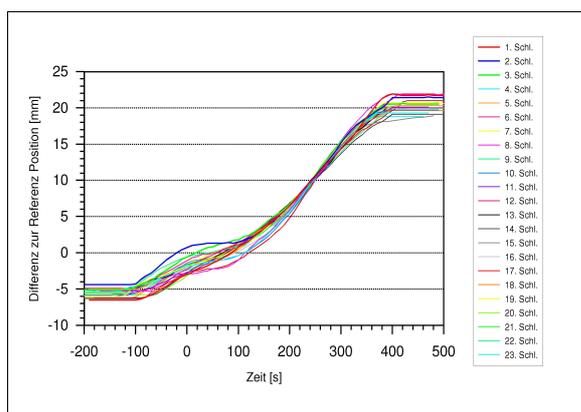


Abbildung 4: Wiederholbarkeit der bewegten Phasen aus 23 Füllvorgängen, Pfeiler Block 6 O

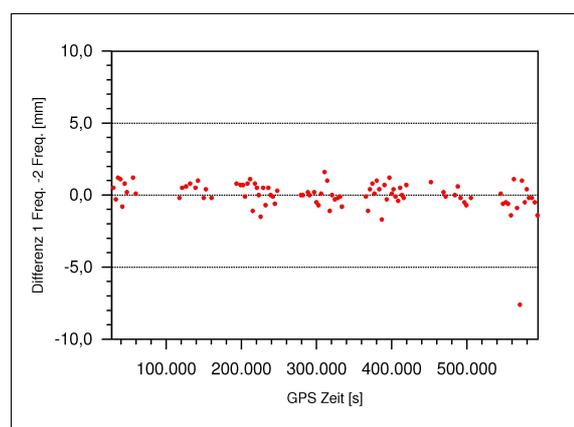


Abbildung 5: Differenz 1-Freq. - 2-Freq.-Ergebnisse

Um die Wiederholbarkeit der bewegten Phasen zu analysieren, wurden 23 Füllvorgänge (Abb. 4) zeitlich verschoben übereinander geplottet. Man sieht deutlich, daß das Bewegungsverhalten der Wand und die Messergebnisse innerhalb eines ± 1 mm Bereiches konsistent bzw. reproduzierbar sind.

Während der Messungen wurden sog. 2-Frequenz-GPS-Empfänger (L1, L2) eingesetzt. Ohne signifikante Einschränkungen können auch Einfrequenzantennen und -empfänger verwendet werden, sofern auf hochwertige Geräte zurückgegriffen wird, deren Meßrauschen klein genug für die hier geforderten Genauigkeiten ist. Exemplarisch wurde eine L1-Auswertung für den Pfeiler Block 6 auf der Ost-Seite durchgeführt. Die Abb. 5 verdeutlicht die geringen Differenzen der Ergebnisse bei der Verwendung von Ein- und Zwei-Frequenzempfängern.

Die Ergebnisse dieser technisch hochqualitativ ausgestatteten Untersuchung unter praktischen Einsatzbedingungen zeigen, dass es möglich ist, kurzzeitige dynamische Deformationen eines Bauwerks mit Amplituden von 25 Millimetern und einer Genauigkeit von 1 Millimeter in Echtzeit nachzuvollziehen.

Literatur

[1] Abschlussbericht: GPS-Messungen an der Schleuse Uelzen 1, Hamburg, Garbsen, Entwurf September 2001

Anschrift der Autoren

Prof. Dipl.-Ing. Peter Andree
Hochschule für Angewandte Wissenschaften
Fachbereich Geomatik / AFB Hydrographie
Hebebrandstrasse 1
D-21073 Hamburg
Tel.: 040 – 7914 2525 / Fax.: – 7914 2526
e-mail: andree@tu-harburg.de

Dr.-Ing. Gerhard Wübbena, Dipl.-Ing. Andreas Bagge, Dr.-Ing. Martin Schmitz
Geo++[®] Gesellschaft für satellitengestützte geodätische und navigatorische Technologien mbH
Steinriede 8
D-30827 Garbsen
Tel.: 05131 – 46890 / Fax: 05131 – 468999
e-mail: gerhard.wuebbena@geopp.de, andreas.bagge@geopp.de, martin.schmitz@geopp.de