

PERMANENTE ÜBERWACHUNG MIT GPS - Erfahrungen und Perspektiven -

Hans - Peter Fitzen, Manfred Bäumker
FH Bochum, Lennerhofstr. 140, 44707 Bochum

Summary

1996 ging die erste permanente GPS-Messanlage des „Slow-Motion-Measuring-Systems (SMMS)“ zur permanenten Überwachung („Monitoring“) eines Absperrbauwerks in Betrieb. Weitere Installationen folgten. Die zunehmende Ausstattung der Talsperrenwarten mit Rechnersystemen ermöglicht heute eine Integration und automatisierte Überwachung dieser Messkomponente innerhalb eines Talsperrenleitsystems. Bei GPS-Messanlagen im Dauerbetrieb können Probleme durch Mehrwegeeffekte, Abschattungen, Wettereinflüsse u.a. auftreten. Über deren Auswirkungen auf das Messergebnis sowie über die Systemzuverlässigkeit und Verfügbarkeit wird berichtet.

Das SMMS Messsystem

Die Abschätzung von Restrisiken bei Talsperren, Rutschhängen oder anderen Objekten erfordert immer Kenntnisse über deren aktuelles Verhalten. Eine zeitnahe Erfassung der Objektbewegungen - und wenn es nur in ausgewählten Punkten ist - hat deshalb schon immer besonderes Gewicht. Traditionell werden u.a. sog. „geodätische Messungen“ in festen Zeitabständen von z.B. einem Jahr, einem halben Jahr oder in noch kürzeren Intervallen ausgeführt. Hier hat sich in den letzten 10 Jahren viel getan: mittlerweile sind kinematische Messverfahren verfügbar, mit denen sich - wenn erforderlich - die Bewegungen permanent und in Echtzeit erfassen lassen.

Speziell für die Positionierung bewegter Objekte sind die Satellitenmessverfahren (GPS, GLONAS, GALILEO) konzipiert, allerdings bestenfalls im Genauigkeitsbereich einiger Dezimeter. Schon mit dem ersten Einsatz von GPS Messsystemen für geodätische Zwecke (Zentimeterbereich) Anfang der neunziger Jahre kam die Idee auf, diese Messmethode für Überwachungsaufgaben und auch für kinematische Aufgaben (Messungen unter Bewegung) einzusetzen. Für den Subdezimeterbereich kommt auch heute unverändert nur die sog. Trägerphasenlösung in Frage. Dabei müssen über etwa 15 Minuten zeitgleich die Signale von mindestens vier identischen Satelliten auf zwei Messstationen empfangen werden (Precise Differential GPS). Innerhalb dieser Zeit muss die unbekannte Anzahl der vollen Trägerwellenlängen (bei L1 ca. 19 cm) zwischen Empfangsantenne und Satellit ermittelt werden. Zusammen mit dem gemessenen Phasenreststück ergibt sich als Resultat der dreidimensionale Vektor (Delta X, Delta Y und Delta Z) zwischen den beiden beobachteten Stationen. Werden in einer der beiden Stationen zusätzlich Bewegungen zugelassen, so müssen auf beiden Stationen fünf Satelliten zeitgleich beobachtet werden, zumindest in der Initialisierungsphase. Da die Satelliten räumlich verteilt sind (und auch sein müssen), besteht immer die Gefahr, dass sie (wegen Hindernissen wie Gebäude, Bäume u.a.) nicht auf beiden Punkten zeitgleich „sichtbar“ sind. Eine Verbesserung bringt hier der Einsatz von Zweifrequenzempfängern, die eine heutzutage schnelle Trägerphasenlösung innerhalb weniger Minuten ermöglichen.

Solche geodätischen Zweifrequenzempfänger sind immer für permanente Messungen zur Erfassung von Bewegungen geeignet. Wegen des hohen Gerätepreises und wegen der dadurch erhöhten Diebstahl- und Vandalismusgefahr gibt es aber kaum Betreiber, die dieses Risiko eingehen können. Für bezahlbare und kalkulierbare permanente Messeinsätze ist ein anderer, neuer Ansatz notwendig.

Dem 1996 von den Verfassern entwickelten „Slow-Motion-Measuring-Systems (SMMS)“ liegt der Ausgangsgedanke zugrunde, dass nur langsame Bewegungen ($<10\text{cm} / \text{Minute}$) beobachtet werden. In diesem Fall ist der Einsatz der deutlich preisgünstigeren Einfrequenzempfänger möglich. Die Messsensoren (GPS-Empfänger) bestimmen in jeder Sekunde zu den sichtbaren Satelliten das Phasenreststück und senden das Messergebnis an einen zentralen Prozessrechner, der alle weiteren Berechnungen durchführt. Der Anfangsvektor muss einmalig beim ersten Systemstart während einer Messungsdauer von etwa 20 Minuten bestimmt werden. Seine zeitabhängige Änderung lässt sich anschließend aus den permanenten Messungen mit Hilfe der Kalmanfiltertechnik in Echtzeit modellieren und bei einem evt. Systemneustart oder nach einem kompletten Satellitenausfall zur Initialisierung verwenden [1].

Der Prozessrechner ermittelt für jeden Vektor alle 10 Sekunden eine Lösung, die rekursiv geglättet und alle 100 Sekunden als 3-D-Position abgespeichert wird. Aus den gemessenen 3-D-Positionen lassen sich in Echtzeit über gleitende Mittelwertfilter permanent Einstundenmittel, 6-Stunden-, 12-Stunden- und 24-Stunden-Mittel generieren, die für graphische Darstellungen, Dokumentationszwecke und natürlich zusätzlich für Warn- und Alarmmeldungen genutzt werden (Abb. 1).

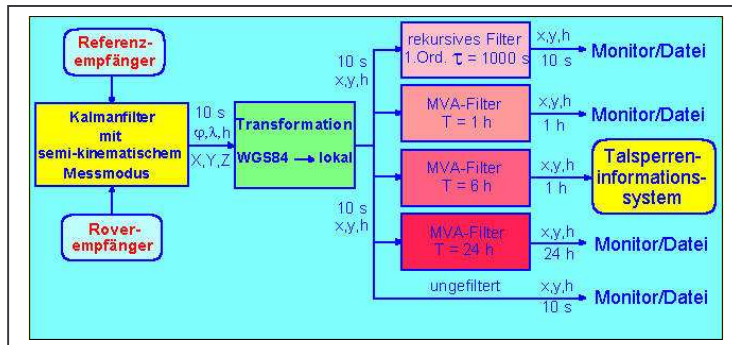


Abbildung 1: Blockdiagramm SMMS Berechnungen

Neben dem hier im Kalmanfilter modellierten semikinematischen Lösungsansatz für den Einsatz von GPS-Einfrequenzempfängern auf bewegten Punkten gibt es weitere, meist statische Messkonzepte, die aber nur eine Momentaufnahme der aktuellen Position wiedergeben können (siehe z.B. [4]).

Eine GPS-Messeinrichtung besteht nun aus einer Referenzstation und mindestens einem zu beobachtenden Punkt (Rover). Weitere (nahezu beliebig viele) Roverstationen können zeitgleich beobachtet werden. Grundsätzlich sinnvoll (nicht zwingend) ist die Errichtung eines Rovers auf einem zweiten Stabilpunkt (siehe Abb. 2, hier Rover 1). Auf diese Weise wird die Positionsstabilität des Referenzempfängers durchgreifend kontrolliert. Die y-Richtung ist im u.a. Beispiel die kritische Richtung. Ohne Mehraufwand fällt bei diesem Messverfahren die x-Komponente und (mit etwas reduzierter Genauigkeit) auch die Höhe der Roverstationen in Echtzeit an.

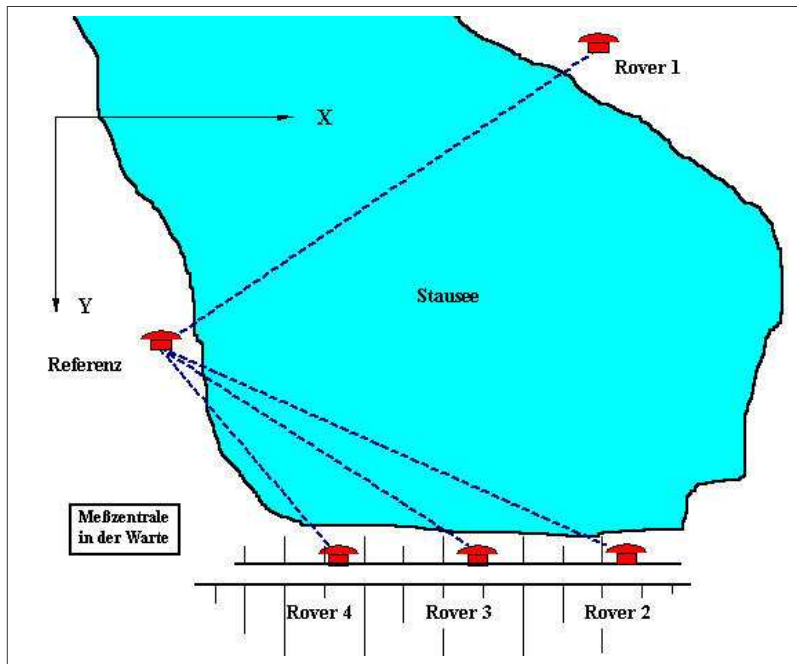


Abbildung 2: Anordnung von Referenz- und Roverstationen

Integration in ein Überwachungssystem

Die Präsentation von 10-Sekunden-Messwerten in Echtzeit – gleich ob in graphischer oder numerischer Form – ist für den Experten interessant, für den Regelfall eines Monitorings, das durch die Mitarbeiter in der Betriebswarte erfolgt, aber eher hinderlich. Insbesondere wenn mehrere Messstationen betrieben werden, wächst die Datenmenge schnell an, so dass sie unüberschaubar wird. Hier ist sicherzustellen, dass

- die erzeugten Messwerte für eine evt. spätere Nachbearbeitung vollständig dokumentiert und in geeigneter Auswahl an einen Zentralrechner übergeben werden (siehe Abb. 1).
- der Betriebszustand und die aktuellen Messresultate für die Mitarbeiter in der Talsperrenwarte in einfach zu überblickender Weise aufbereitet werden
- wichtige Informationen (Warnungen, Alarme) rechtzeitig und unmittelbar den verantwortlichen Mitarbeitern zugeleitet werden.

Zur schnellen Information der Betriebswarte sind visuelle Darstellungen besonders geeignet. Die aktuellen Betriebszustände und die Resultate aller GPS-Stationen einer Installation werden dazu in einer Graphikoberfläche dargestellt. Für jeden Empfänger gibt es eine Ampel, die durch die Farbgebung über den Systemstatus informiert:

- rot = Messung nicht möglich; keine ausreichenden Satellitendaten oder Messgeräteausfall
- gelb = Satellitenempfang, aber keine ausreichend genaue Position
- grün = alles o.k.

Unterhalb der Ampeln werden in einem Weg-Zeitdiagramm alternativ die x-Komponenten, die y-Komponenten oder die Höhen aller Stationen in einer Gesamtübersicht dargestellt. Üblicherweise sind das derzeit die Ergebnisse der 24h-Messungen.

Andere Ergebnisse (z.B. 6h-Werte) sind natürlich möglich. Das reicht im Standardbetrieb für die Regelkontrolle der kompletten GPS-Messinstallation aus (Abb. 3).



Abbildung 3: Echtzeitkontrolle in der Warte

Außerdem werden automatisch Warn- und Alarmmeldungen generiert und auf geeignetem Weg unmittelbar verschickt. Über ein vom Rechner gesteuertes GSM-Modul werden Meldungen als SMS-Nachrichten an die verantwortlichen Betriebsstellen und Leiter versandt, wenn zuvor festgelegte Grenzwerte überschritten werden oder bestimmte Betriebszustände eintreten. Diese Meldungen können Warnungen sein (z.B. bei Erreichen bestimmter Ablagen, bei längerem Ausfall einer Messstation u.ä.) oder Alarmmeldungen bei Annäherung an einen kritischen Grenzwert oder bei Ausfall der Versorgungsspannung. Auf diesem Wege werden unabhängig von den Entscheidungen in der Betriebswarte die Verantwortlichen automatisch, unmittelbar und rechtzeitig im Vorfeld einer evt. kritischen Entwicklung informiert. Das „SMMS“-GPS-Messsystem ist eine autonome Komponente zur 3-D-Positionierung, die sich problemlos in die Vielzahl anderer Messanlagen eines Talsperrenbetriebs einbinden lässt.

Genauigkeitspotential permanenter GPS-Messeinrichtungen

Die einzelne GPS-Positionsbestimmung mit Trägerphase besitzt aufgrund des Signalrauschens eine (einfache) Standardabweichung in der Größe von etwa 7 mm bis 15 mm. Sie ist weitgehend unabhängig davon, ob Ein- oder Zweifrequenzempfänger genutzt werden. Diese Standardabweichung hängt u.a. von der Qualität der verwendeten Messkomponenten ab. Eine deutliche Genauigkeitssteigerung ist aber durch eine Erhöhung der Messungsanzahl und der Länge der Messepoche zu erreichen. Ab etwa 12 h kontinuierlicher Beobachtungszeit sind Standardabweichungen im 1 mm Bereich möglich, wobei noch systematische Effekte zu beachten sind. Insbesondere unerwünschte Signalreflexionen (Multi-Path) aus der Nachbarschaft des Anten-

nenstandpunkts belasten das Ergebnis (in Abb. 4 mit bis $\pm 10\text{mm}$). Sie sind im Verhältnis zur angestrebten Standardabweichung von 1 mm bedeutend und müssen beachtet werden. Da Multi-Path täglich in annähernd gleicher Größe auftritt, ist dieser Effekt im 6-Stundenmittel bereits deutlich reduziert, im Tagesmittel (bei gleichmäßiger Verteilung der zahlreichen Messungen über den Tag) weitgehend eliminiert. Messkonzepte, die nur wenige statische Messungen über den Tag verteilt vorsehen, sind nicht in der Lage, diese Effekte wirkungsvoll zu eliminieren.

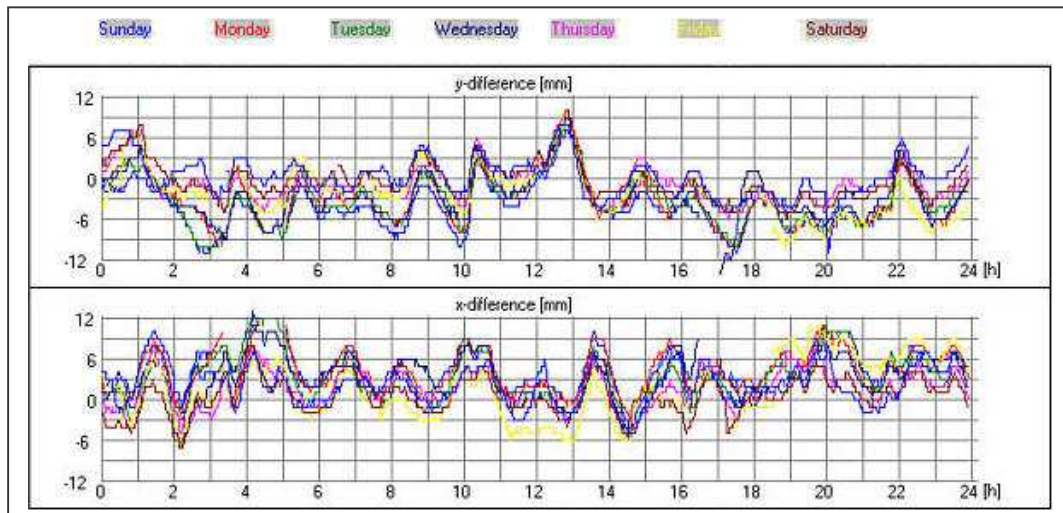


Abbildung 4: Multi-Path-Effekte (Lage) über eine Woche (siderischer Tag)

Einfluss von Abschattungen

Der Einsatz von Satellitenmessverfahren zur Positionsbestimmung setzt voraus, dass während der Messzeit möglichst alle Satelliten oberhalb von 15° Höhenwinkel empfangen werden. Wenn die direkte Verbindung zwischen Empfangsantenne und Satellit durch „Abschattungen“ wie Berge, Häuser und andere topographische Gegenstände oder auch Bäume, Autos oder Menschen beeinträchtigt wird, kann das Signal dieses Satelliten nicht empfangen werden. Bei permanenten Messungen sollte idealerweise Horizontfreiheit über 15° Höhenwinkel herrschen. Diese Forderung kann nur selten ohne Einschränkungen erfüllt werden. Ein Monitoring mit dem GPS-Verfahren kann aber auch unter Abschattungen erfolgreich sein. GPS-RTK-Messungen benötigen für die Positionsbestimmung i.d.R. mindestens 5 Satelliten und einen PDOP-Wert < 6 . Bei dem vom „SMMS“ genutzten „semikinematischen“ Verfahren erfolgt eine Positionierung bereits ab vier Satelliten, was für einen Einsatz unter Abschattungsbedingungen von Vorteil ist. Hier muss es also zu erheblichen Einschränkungen kommen, bevor der Einsatz dieses Verfahrens unmöglich wird. Im konkreten Einzelfall sind vor einer Installation anhand der örtlich ermittelten Hindernisse die Ausfallzeiten und die möglichen Geometriedefekte zu ermitteln. Erst dann kann eine Prognose über die erreichbare Genauigkeit gegeben werden.

In einer Installation ähnlich Abb. 2 ist zusätzlich zu den Punkten auf der Sperrmauer ein weiterer Festpunkt zu Kontrollzwecken mit einer GPS-Messstation besetzt. Wegen der örtlichen Umstände befindet sich dieser auf einer Prallmauer unmittelbar unterhalb der Sperre. Dort bestehen in einem weiten Bereich Abschattungen in

westlicher Richtung bis zu 30° Höhenwinkel (siehe Abb. 5). Hierdurch sind GPS-Positionsbestimmungen nicht mehr zu jeder Tageszeit möglich. Über den Tag ergeben sich dadurch Ausfallzeiten von etwa 5% (abhängig von der jeweiligen Satellitenkonstellation), in denen für eine Positionsbestimmung nicht genügend Satelliten (weniger als 4) empfangen werden. Bis zu einer Grenze von etwa 10% (2,5 Stunden Ausfallzeiten) hat das nach unseren Erfahrungen noch keine entscheidende Bedeutung. Darüber hinaus ist allerdings mit einem Verlust der erreichbaren Genauigkeit zu rechnen.

Als Beispiel möge eine massive Abschattung im Bereich einer Hangrutschung dienen (Abb. 6): Hier treten in östlicher und südlicher Richtung Abschattungen bis zu 50° auf (dicht bewaldete Bergrücken). Auch in westlicher Richtung behindern Berge bis zu 30° Höhenwinkel den Satellitenempfang. Das führt zu täglichen Ausfallzeiten von etwas über 50%: statt der maximal möglichen Messungsanzahl von 8640 werden hier in bestimmten Zeitfenstern nur noch etwa 4000 Positionsbestimmungen pro Tag durchgeführt. Messungen sind nur noch in den grün und blau markierten Zeiten möglich. Für die zu erledigende Aufgabe (Hangrutschung) hat das keine entscheidende Bedeutung, da in dieser Anwendung keine Standardabweichungen im 1mm-Bereich erwartet und nicht benötigt werden. Deshalb kann dann auch bei massiven Abschattungen permanentes GPS-Monitoring erfolgversprechend eingesetzt werden.

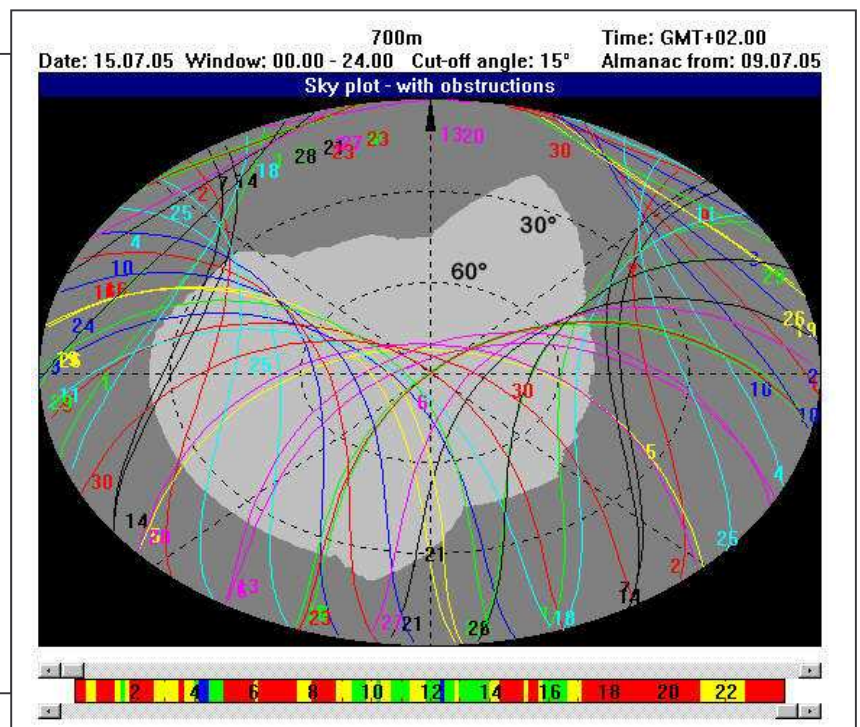
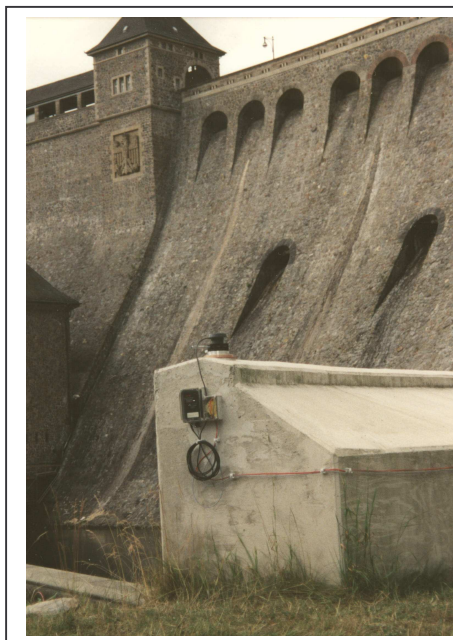


Abbildung 5: Abschattung durch Sperre Abbildung 6: Abschattung Hangrutschung

Unter starken Abschattungen empfiehlt sich zukünftig (ab etwa 2011) die zusätzliche Nutzung der europäischen Galileo-Satelliten. Sobald neben den GPS-Satelliten zwei oder mehr dieser Satelliten empfangen werden, ergeben sich Zusatzinformationen, die eine Abschattung oder einen aktuellen Geometriedefekt beheben können. Dieser Vorteil muss allerdings mit höheren Hardwarepreisen (Zwei-Systemempfänger) und erhöhtem Auswerteaufwand erkauft werden.

Einfluss der Witterung

Permanente Messungen stellen besondere Anforderungen an die gesamte Ausrüstung. Während Präzisionsmessungen sinnvollerweise nur unter günstigen Witterungsbedingungen durchgeführt werden – nur dann sind gute und zuverlässige Resultate zu erwarten – werden bei einem Monitoring gute und zuverlässige Messergebnisse kontinuierlich über 24 Stunden an 365 Tagen im Jahr erwartet. Die Frage nach den Rahmenbedingungen der Messungen wird nicht gestellt, da permanente Messungen immer beobachterlos erfolgen. Aber nicht nur der Beobachter ist witterungsanfällig, auch die Messverfahren sind nicht völlig frei von solchen Einflüssen. Optische Messverfahren fallen aus, sobald Sichten durch starken Regen, Schnee oder Nebel unmöglich werden. Vereisungen können mechanische Messanlagen blockieren. Ähnliches ist bei hohen Temperaturen möglich. Im Gegensatz dazu hat das Wetter bei allen Satellitenmessverfahren (GPS, GLONAS und Galileo) nur geringen Einfluss, sie sind aber nicht völlig unabhängig davon. Einen wetterbedingten Ausfall wie bei optischen Verfahren gibt es allerdings nicht. Die Messung der Satellitensignale funktioniert immer, wenn auch mit gewissen Qualitätseinschränkungen.

Die Temperatur könnte elektronische Bauteile beeinflussen und so das System beeinträchtigen. Für die GPS-Boards sind Spezifikationen von -30°C bis über 80°C nicht ungewöhnlich, für die Antennen gelten z.T. noch größere Temperaturbereiche. Bei Installationen in der prallen Sonne oder auf freien Bergkuppen in Höhen über 1000m sind diese Temperaturen nicht auszuschließen und dürfen die Funktionsfähigkeit der Messanlage nicht beeinträchtigen. Ein Ausfall der GPS-Empfänger wegen Temperatureinfluss konnte bei unseren Installationen bisher nicht beobachtet werden. Da gibt es eher Probleme mit dem Rechner, der z.T. in speziell geschützten Schränken steht und bei nicht ausreichender Lüftung seinen Dienst versagt.

Alle elektronischen Messanlagen sind bei Gewittern besonderen Gefahren ausgesetzt. Die hohen Spannungen induzieren Fremdfelder, die ohne unmittelbaren Blitzeinschlag die Messeinrichtung zerstören können. GPS-Anlagen sind besonders gefährdet, da die Antennen (möglichst abschattungsfrei) in der Regel auf höchsten Punkten installiert sind. Insbesondere gegen Überspannungen muss die gesamte Installation geschützt werden. Deshalb sind alle Ein- und Ausgangsleitungen der elektrischen Komponenten (GPS-Empfänger, Repeater, Rechner u.a.) und auch die Stromversorgung durch Überspannungselemente zu sichern. Hier sind bei jeder Installation die besonderen Rahmenbedingungen zu beachten. Das Risiko, die Messeinrichtung durch Überspannung zu verlieren, kann dadurch reduziert, aber nicht völlig ausgeschlossen werden: kommt es zu einem unmittelbaren Blitzeinschlag, ist das jeweilige Bauteil endgültig zerstört.

Die bisherigen Erfahrungen zeigen, dass ein Schutz gegen Überspannungen überall erforderlich ist, also nicht nur in exponierten Lagen auf Bergkuppen. Ansonsten droht ein Verlust, zumindest aber der zeitweise Ausfall der einzelnen Messstation in Folge von Gewittern. Ein solcher Verlust ist bei unseren Installationen bisher nicht aufgetreten, wohl kann es zu Problemen kommen, solange das Überspannungskonzept nicht konsequent realisiert ist.

Regen, Schnee und Nebel beeinflussen das Satellitenmessverfahren nicht unmittelbar. Positionsbestimmungen sind weiterhin uneingeschränkt möglich. Allerdings wird das Messsignal (Mikrowelle) durch den erhöhten Wassergehalt in der Luft beeinflusst. Diese Einwirkung ist gering, kann aber bei einem Messverfahren im Millimeterbereich deutlich das Resultat verändern. So kommt es immer dann, wenn Schnee oder Eis auf den Antennen liegen bleibt, selbst bei den Tagesmittelwerten zu Veränderungen von teilweise 10 Millimetern (abhängig von der Schnee- bzw. Eisstärke). Abdeckhauben verbessern die Situation nicht wesentlich, da sich auch daran Schnee und Eis ablagert. Nach bisherigen Erfahrungen ist eine ungeschützte Installation der GPS-Antenne (Durchmesser <10cm) auf einem ähnlich schlanken Pfeiler am besten geeignet. Schneeablage bzw. Vereisung werden zwar nicht verhindert, auf der kleinen Antenne halten sich diese aber nicht lange. Andere Konzepte sind möglich aber immer mit erhöhtem technischen oder personellen Aufwand verbunden.

Systemverfügbarkeit

Entscheidend für den Einsatz eines Messsystems bei einer Überwachungsaufgabe ist die Zuverlässigkeit im Alltag. Jeder Ausfall der Anlage, der nicht durch die Mitarbeiter der Warte standardmäßig behoben werden kann, behindert einen geregelten Betrieb. Ziel muss es sein, dass die Messanlage ohne Eingriffe 24 Stunden am Tag und 365 Tage im Jahr verfügbar ist und in dieser Zeit auch alle möglichen Messungen ausführt.

Ausfälle des GPS-Messsystems sind natürlich nicht völlig auszuschließen. Diese können durch einen Ausfall der Betriebsspannung verursacht sein. Das ist prinzipiell unkritisch, da die gesamte Messanlage nach einer Wiederherstellung der Stromversorgung automatisch ohne jeden Eingriff hochfährt. Dabei können einige wenige nicht gespeicherte Daten verloren gehen. Eine Information über den Ausfall gibt es erst im Nachhinein.

Für die heutigen Rechner und die komplexen Betriebssysteme kann ein häufiger Systemabsturz durch Stromausfall kritisch sein. Deshalb sollte eine Warnung über den drohenden Ausfall erfolgen. Die zusätzliche Installation einer unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV) kann hier weiterhelfen. Sie versorgt das Messsystem nach einem Stromausfall noch einige Zeit, so dass programmgesteuert Warn- oder auch Alarmmeldungen (z.T. telefonisch per SMS) abgesetzt werden können. Anschließend werden alle Dateien geschlossen und der Rechner kontrolliert heruntergefahren. Er verbleibt in einem Wartezustand bis die Betriebsspannung wiederhergestellt ist, um dann automatisch zu starten.

Fehler im GPS-Empfänger können die Systemverfügbarkeit beeinflussen. Ein Stromausfall führt wie ein Ausfall des Satellitenempfangs zu einem Warnhinweis in der Warte (roter Punkt in Abb. 3). Die Ursachen lassen sich leicht prüfen und direkt beheben. Einen Ausfall der GPS-Satelliten hat es bisher nicht gegeben, lediglich gab es Einschränkungen während des Balkankriegs. Auch hier eröffnet die Einführung des Galileo-Satellitensystems neue Perspektiven: eine zuverlässige Positionierung ist dann mit dem einen oder dem anderen System oder aus der Kombination beider Systeme möglich: ein für den Betreiber wichtiger Aspekt unter dem Gesichtspunkt „Zuverlässigkeit“. Im übrigen ist ein manueller oder auch ein rechnergesteuerter

Neustart des jeweiligen GPS-Empfängers möglich, wenn z.B. ein offensichtlich fehlerhaftes Tracken des Satellitensignals festgestellt wird.

Exemplarisch sei die Verfügbarkeit einer Messanlage mit 4 Roverstationen auf einem Absperrbauwerk für das Jahr 2005 dargestellt. Erfolgt alle 10 Sekunden eine Messung, so erzeugt jeder Rover 3.153.600 Messergebnisse pro Jahr. Hiervon wurden im Schnitt 97% tatsächlich ausgeführt (Tab.1). Dabei ist zu berücksichtigen, dass die hier betrachtete (ältere) Installation weder eine USV besitzt noch eine automatische Warnung bei Stromausfall absetzt. Allein durch eine zu spät erkannte Unterbrechung der Stromversorgung wurden in 2005 mehr als zwei komplette Ausfalltage verursacht, die korrigiert wurden. Bei einer Messstation mit USV und automatisch generierten Warn- und Alarmmeldungen sind deshalb Verfügbarkeiten von 99% und mehr durchaus realistisch.

	Verfügbarkeit 2005	Ausfalltage	korrigierte Verfügbarkeit
Rover 1	97.7 %	2	98.2 %
Rover 2	95.6 %	2	96.1 %
Rover 3	97.0 %	2	97.5 %
Rover 4	97.6 %	2	98.1 %

Tabelle 1: Verfügbarkeit der 4 Rover einer SMMS Installation

Die Zuverlässigkeit der Messeinrichtung kann durch eine zusätzliche Roverstation, die nicht auf der Mauer, sondern im stabilen Gelände steht, überprüft werden. Da dieser Punkt wie ein veränderlicher Rover behandelt und berechnet wird, zeigen sich in seiner Stabilität die Auswirkungen aller Unsicherheiten. In Abb. 3 stellt die braune Linie die Messung eines solchen Kontrollpunktes dar. Im Zeitraum von 200 Tagen ergeben sich bei seinen Tagesmittelwerten maximale Ablagen von $\pm 1,5\text{mm}$. Die Standardabweichung für das einzelne 24h-Mittel lässt sich daraus zu deutlich besser als 1mm abschätzen.

Ausblick

In den vergangenen 10 Jahren hat das SMMS-Messsystem nachgewiesen, dass auch mit dem Satellitenmessverfahren ein zuverlässiges Monitoring im Bereich von 1mm möglich ist. Mit dieser Genauigkeit liegt es in einer Größenordnung wie sie sonst nur von Lotanlagen erreicht wird und kann deren Ergebnisse auf völlig unabhängigem Wege stützen. Unter Abschattungsbedingungen ist (je nach Maß der Abschattung) derzeit noch ein Genauigkeitsverlust zu erwarten. Ab 2011 wird mit der Betriebsbereitschaft des europäischen Satellitensystems Galileo auch hier eine deutliche Verbesserung eintreten.

Literatur

- [1] Bäumker, M., H.-P. Fitzen (1996): Permanente Überwachungsmessungen mit GPS. In: Beiträge zum XII. Internationalen Kurs für Ingenieurvermessung. Graz 1996
- [2] Backhausen, D., M. Bäumker, H.-P. Fitzen (2000): Hochgenaue Überwachung von Bauwerken mit fest installierten Real Time GPS-Systemen. In: Zeitschrift für Vermessungswesen 125, Vol 2000, S. 369-376
- [3] Bäumker, M., H.-P. Fitzen (2001): Permanente Überwachung von Bauwerken mit hybriden Messsystemen. In: Proceedings 11. Internationale Geodätische Woche, Obergurgl, Ötztal/Tirol, 2001.
- [4] Manetti, L. (2004): RMS – Remote Monitoring System: GPS application on an Harbour Structure. In: Ingenieurvermessung 2004; 14th International Course on Engineering Surveying ETH Zürich 2004