GPS-based Online Control and Alarmsystem (GOCA) - Leistungsstandards des GOCA-Systems und praktischer Einsatz am Beispiel Kops-Staumauer (Illwerke, Österreich)

Irene Feldmeth[1], Reiner Jäger[1,2] und Rupert Zischinsky[3]

Fachhochschule Karlsruhe – University of Applied Sciences
[1] Institut für Innovation und Transfer
[2] Studiengang Vermessung und Geomatik
Moltkestraße 30, D-76133 Karlsruhe, Email: reiner.jaeger@fh-karlsruhe.de
URL: www.fh-karlsruhe.de/iit/goca

[3] Präzisionsmeßtechnik (EMT) - Vorarlberger Illwerke AG, Österreich
Batloggstraße 36, A-6780 Schruns, Email: rupert.zischinsky@illwerke.at

1. Einleitung

Das GPS-basierte online Kontroll- und Alarmsystem (GOCA) wird im Rahmen des gleichnamigen vom Bundesministerium für Forschung und Technologie geförderten Forschungs- und Entwicklungsprojektes an der Fachhochschule Karlsruhe – University of Applied Sciences in Kooperation mit der Firma GeoNav entwickelt. GOCA befasst sich mit dem Einsatz des Satellitensystems GPS zur Echtzeitüberwachung von Bewegungen der Erdoberfläche. Neben dem Einsatz im Naturkatastrophenschutz (Hangrutschungsüberwachung, Vulkanüberwachung, Erdbebenvorhersage) ist das fernwartungsfähige GOCA-System auch in der online Überwachung und Alarmierung bei sicherheitsempfindlichen Bauwerken und geotechnischen Anlagen aller Art (wie z.B. Staumauern) einsetzbar.

Das GOCA-System besteht aus einem Satz zentral steuerbarer GPS-Empfänger, die über eine Sensorsteuerungssoftware von der sog. GOCA-Zentrale aus in vorgegebenem Zeittakt abgetastet werden. Die resultierenden Baselinevektoren zwischen Basisstation(en) und Roverstation(en) mit zugehöriger Genauigkeitsinformation werden für die Weiterverarbeitung mit der GOCA-Deformationsanalysesoftware von der Sensorsteuerungssoftware auf einer klar definierten Schnittstelle, die für beliebige GPS-Sensorsysteme offen ist, zur Verfügung gestellt. Zur Steigerung der Flexibilität des Systems und zur Minderung von Hardwarekosten wurde von der GeoNav GmbH darüber hinaus ein eigener GPS-Empfänger (GOCA-Sensor) entwickelt. Das GOCA-Deformationsanalysekonzept verfolgt eine klassische Unterteilung in Stabil- und Objektbereich, d.h. die Berechnung der Objektpunktkoordinaten erfolgt für jedes Abtastintervall in Referenz zu den Punkten im stabilen Bereich auf der Basis des statistischen Qualitätssicherungskonzepts einer Netzausgleichung.

Seit Juni 2001 wird das GOCA-System auf Basis von 3 GOCA-Sensoren zum Monitoring der Kops-Staumauer der Vorarlberger Illwerke AG eingesetzt. Die Analyse der Objektpunktbewegungen wird mittels der in der GOCA-Software implementierten Kalman-Filter-Module durchgeführt. Dabei können ausgehend von den online berechneten Objektpunkt-Zeitreihendaten als Zustandsvektor samt Genauigkeiten die Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung für jeden Objektsensor fortlaufend geschätzt, visualisiert und auf Signifikanz geprüft werden. Die Kalmanfilterung kann dabei sowohl im Standard der L2- als auch als robuste L1-Norm-Schätzung des o.g. Zustandsvektors erfolgen. Im nachfolgenden Beitrag werden die Ergebnisse der durchgeführten Analysen der Objektpunktbewegungen der Kops--Staumauer präsentiert.

2. GOCA - SYSTEMBESCHREIBUNG

2.1 Anforderungsprofil und Systemcharakteristika

Das System GOCA erfasst auf Basis von GPS-Beobachtungen millimetergenau Bewegungen auf der Erdoberfläche. Die Einsatzmöglichkeiten von GOCA erstrecken sich von Online-Überwachungen der Bauwerke und geotechnischen Anlagen aller Art, über Hangrutschungs- und Böschungsüberwachungen, Beobachtungen von Vulkanen, Gletschern und seismisch aktiven Zonen bis hin zu Überwachungen von Talsperren, Schleusen und Pegeln.

Die GOCA-Hardware besteht aus einem Satz von GPS-Sensoren und Kommunikationseinheiten, die als Sensor-Array im Überwachungsbereich installiert werden. GOCA verwendet die von den Empfängern bereitgestellten DGPS-Baselines, die zur Weiterverarbeitung auf die sogenannte GOCA-Zentrale übertragen werden. Die GOCA-Zentrale, die aus einem PC und einer Datenschnittstelle besteht, übernimmt die Weiterverarbeitung bzw. die eigentliche Deformationsanalyse dieser DGPS-Daten. Jede lokale GOCA-Zentrale kann über einen Fernwartungsmodus von einem anderen PC aus angesprochen werden. Auf diese Weise können ein oder mehrere Überwachungsobjekte von einer übergeordneten Zentrale aus verwaltet werden. GOCA kann als permanentes System am Objekt installiert werden oder als mobiles „Task-Force“ System zum Einsatz in Gefahrenzonen genutzt werden.

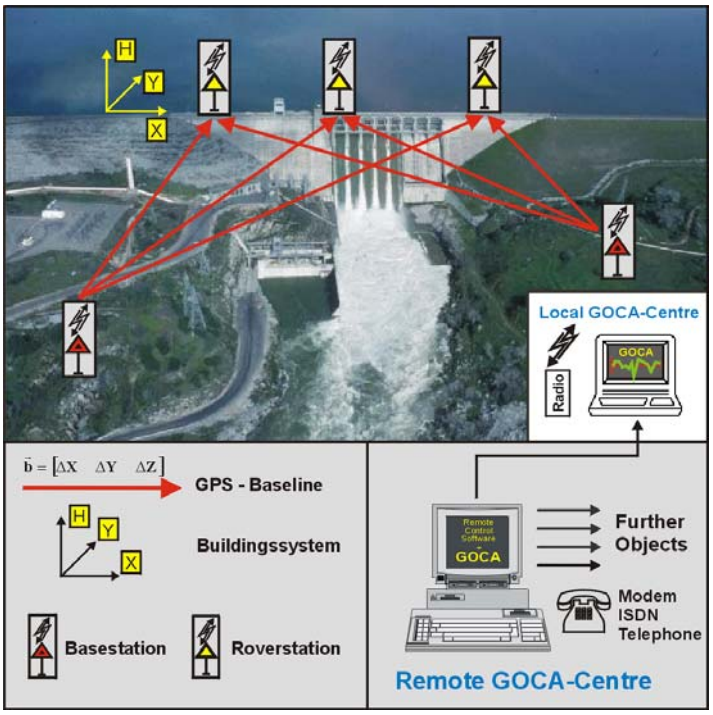

Abbildung 1: GOCA-Prinzipskizze

Die sogenannte *geometrische Deformationsanalyse* [1],[6] bildet die Grundlage für die Basisversion des GOCA-Systems. Hierzu gehört neben der Überprüfung der Stabilität der Referenzpunkte die Modellierung und statistische Überprüfung der Objektverschiebung, die Berechnung abgeleiteter Deformationsfunktionen (Geschwindigkeit und Beschleunigung) und Trendschätzungsalgorithmen. Zusätzlich sind *systemanalyse*-orientierte Ansätze bzw. Module in Entwicklung, welche die Systemgleichungen des Objekts und die zugehörigen System-Parameter mitberücksichtigen [1].

2.2 GOCA-Deformationsanalysekonzept

Das wichtigste Ziel des GOCA-Systems ist die online Modellierung eines klassischen absoluten Deformationsnetzes [7]. In einem solchen Deformationsnetz wird die Objektgeometrie, d.h. die Koordinaten der sich bewegenden Stationen $\mathbf{x}_O$, durch relative Messungen l vom Typ Vektor-Beobachtung bezüglich eines Referenzsystems $\mathbf{x}_R$ beschrieben. Alle Beobachtungen l werden in die online ablaufende sequentielle Netzausgleichung von GOCA eingeführt. Das Konzept der Netzausgleichung als Basis für die fortlaufende Berechnung des Objektzustandes bietet folgende Vorteile:

- Auch überbestimmte Fälle in der Bestimmung der Referenzpunkt- und Objektgeometrie sind konzeptionell zulässig. Bei der Schätzung der Objektpunktkoordinaten liefert die Ausgleichung nach der Methode der Kleinsten Quadrate die genauesten Ergebnisse.
- Die Netzausgleichung ist ein integratives Verfahren, welches auch für weitere einzeln oder in Kombination mit GPS betriebene Sensorsysteme offen ist (z.B. Totalstationen).
- Die Netzausgleichung des Epochenzustandes liefert im überbestimmten wie auch im nicht überbestimmten Fall eine statistisch gesicherte Aussage zur Genauigkeit der Objekpunktgeometrie und damit auch zu deren Weiterverarbeitung z.B. im Rahmen der Kalmanfilterung (2a-d) oder anderen Trendschätzungen.
- Das Konzept der Netzausgleichung ermöglicht jederzeit die Erweiterung oder Reduzierung (infolge Instabilität) des Referenz- und/oder Objektpunktfeldes.
- Die Netzausgleichung ermöglicht eine der Qualitätssicherung der nachfolgenden Schätzungen und Trendanalysen vorausgehende erste fundierte Qualitätssicherung in Bezug auf die
    - Überprüfung der Baselinebeobachtungen sowohl im Zuge der in jedem Fall überbestimmten sogenannten Initialisierung als auch im überbestimmten Fall im Zuge der fortlaufenden Berechung der Objektpunktkoordinaten.
    - Überprüfung der Stabilität der Referenzpunkte[1], [2], [3].

Die Beobachtungen $\mathbf{l}_i$ und $\mathbf{l}_j$, die zu verschiedenen Epochen $\mathbf{t}_i$ und $\mathbf{t}_j$ durchgeführt werden, ermöglichen die Bestimmung der Objektpunktepochenkoordinaten $\mathbf{x}_{Oi}$ und $\mathbf{x}_{Oj}$ relativ zu den stabilen Referenzpunkten $\mathbf{x}_R$. Die Gesamtheit aller Beobachtungen eines sogenannten Initialisierungszeitraums (z.B. über wenige Minuten, eine Stunde, ein Tag etc.) zu Projektbeginn erlaubt als Netzausgleichung die Berechnung des initialen Referenzpunktfeldes x_R, auf das im weiteren die Objektpunktkoordinaten referenziert werden. Darüber hinaus kann mit der Definition eines zweiten Vergleichszeitraums zu einem späteren Zeitpunkt eine automatische, statistisch gesicherte Überprüfung der Stabilität des Referenzsystems $\mathbf{x}_R$ durchgeführt werden [1], [2], [3].

Beobachtungen zum Zeitpunkt $\mathbf{t}_i$ sind die DGPS-Baselines (Abb. 1) zusammen mit ihren Kovarianzmatrizen $\mathbf{C}_{li}$. Für zwei aufeinanderfolgende Beobachtungsepochen ergeben sich hierbei die folgenden Beobachtungsgleichungen (**A**: Design-Matrix):

$$\mathbf{l}_i + \mathbf{v}_i = \mathbf{A}_{Ri} \cdot \mathbf{x}_{Ri} + \mathbf{A}_{Oi} \cdot \mathbf{x}_{Oi} \quad \text{und} \quad \mathbf{C}_{li} \tag{1a}$$

$$\mathbf{l}_j + \mathbf{v}_j = \mathbf{A}_{Rj} \cdot \mathbf{x}_{Rj} + \mathbf{A}_{Oj} \cdot \mathbf{x}_{Oj} \quad \text{und} \quad \mathbf{C}_{lj} \tag{1b}$$

Unter der Prämisse der Kongruenz des Referenzpunktfeldes $\mathbf{x}_{Ri} = \mathbf{x}_{Rj} = \mathbf{x}_R$ zwischen den Epochen ergeben sich die Koordinaten der auf das Referenzpunktfeld x_R referenzierten Objektpunkte $\mathbf{x}_{Oi}$ und $\mathbf{x}_{Oj}$ zweier Epochen i und j sowie die zugehörigen Kovarianzmatrizen aus einer Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate als

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}_R \\ \mathbf{x}_{O,i} \\ \mathbf{x}_{O,j} \end{bmatrix} \text{und } \mathbf{C}_x = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{R,R} & \mathbf{C}_{R,Oi} & \mathbf{C}_{R,Oj} \\ \mathbf{C}_{Oi,R} & \mathbf{C}_{Oi,Oi} & \mathbf{C}_{Oi,Oj} \\ \mathbf{C}_{Oj,R} & \mathbf{C}_{Oj,Oi} & \mathbf{C}_{Oj,Oj} \end{bmatrix}. \tag{1c,d}$$

Derzeit liegt die minimale Epochenabtastrate des GOCA-Systems im Modus genauer sogenannter statischer Baselines bei $\Delta t_{min} = 15\,s$. Im RTK-Modus liegt sie bereits bei 10 Hz. GOCA führt online die 3-dimensionale Bestimmung des Vektors $\mathbf{x}_O$, des entsprechenden Objektpunktverschiebungsfeldes **u**, seiner Ableitungen (Geschwindigkeiten und Beschleunigungen) und anderer Deformationsfunktionen $f(\mathbf{x}_O)$ durch.

2.3 Hardware- und Kommunikationsdesign

Das GOCA-System kann hardwareunabhängig betrieben werden. Im Kreis der bisher verwendeten Sensoren finden sich Trimble Einfrequenzempfänger 4600 LS, Trimble Zweifrequenzempfänger 4000, 4700 und 5700, Leica Zweifrequenzempfänger 200/300 und SR 530 sowie der von der Firma GeoNav speziell entwickelte kostengünstige GOCA-Empfänger (Abb. 2). Die Stromversorgung kann standardmäßig über 12 Volt Batterien, Solarpanels oder über feste Versorgungsleitungen erfolgen.

Abbildung 2: GOCA GPS-Empfänger der Firma GeoNav nebst Antenne

Die Daten der GPS-Referenzstation(en) werden an die GPS-Roversensoren übertragen, wo die Berechnung der Baselinevektoren stattfindet (Abb. 1). Die Baselinevektoren l, deren Kovarianzmatrizen C_l (1a,1b) und weitere zusätzliche Informationen werden per Funkmodem an die GOCA-Zentrale übertragen.

Die von der Firma GeoNav entwickelte Software MONITOR ist für die Ansteuerung der Empfänger und für die Kommunikation mit den Empfängern verantwortlich [2],[3]. Um die o.g. Hardwareunabhängigkeit des Systems zu gewährleisten wurde für die

GOCA-Software eine klar definierte Schnittstelle konzipiert. Ein vollständiger Datensatz hat mindestens die folgenden Informationen zu umfassen:

- Identifikation von Basisstation und Roversensor
- Zeitpunkt der Aufzeichnung
- Baselinevektor l
- Kovarianzmatrix C_l zum Baselinevektor.

2.4 Alarmierung

Der automatische Alarm in GOCA wird definiert durch einen kritischen Zustandsvektor bezüglich $(\mathbf{u}_O, \dot{\mathbf{u}}_O, \ddot{\mathbf{u}}_O)$. Dies sind die Verschiebungen $\mathbf{u}_O$ relativ zu den Ausgangspositionen x_O der Objektpunkte, die Geschwindigkeiten $\dot{\mathbf{u}}_O$ und die Beschleunigungen $\ddot{\mathbf{u}}_O$.

Das dreidimensionale Verschiebungs-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungsfeld der Objektpunkte $(\mathbf{u}_O, \dot{\mathbf{u}}_O, \ddot{\mathbf{u}}_O)$ wird in GOCA mit der folgenden Übertragungsgleichung in einem Kalman-Filter [8], [9] berechnet:

$$\mathbf{u}_{O(k+1)} = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_O(k+1) \\ \dot{\mathbf{u}}_O(k+1) \\ \ddot{\mathbf{u}}_O(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & [\Delta t] & \left[\frac{1}{2}\Delta t^2\right] \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} & [\Delta t] \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{u}_O(k) \\ \dot{\mathbf{u}}_O(k) \\ \ddot{\mathbf{u}}_O(k) \end{bmatrix} \text{ und } \mathbf{C}_{u,\dot{u},\ddot{u}} \tag{2a,b}$$

Mit $\mathbf{C}_{u,\dot{u},\ddot{u}}$ wird die Kovarianzmatrix der Vorhersage $\mathbf{u}_{O(k+1)}$ bezeichnet. Der aus GOCA stammende Messvektor $\mathbf{l}_{(k+1)} = \mathbf{x}_{O,k+1}$ ($\mathbf{x}_O$ aus 1c) und seine Kovarianzmatrix

$$\mathbf{l}_{k+1} = u_{O(k+1)} + x_{O,Init} \text{ und } \mathbf{C}_{l_{k+1}} = \mathbf{C}_{x_O,k+1} \tag{2c,d}$$

sind zu jedem Aufzeichnungsintervall Δt die aus der online Aufzeichnung und der entsprechenden Netzausgleichung (1a-d) stammende Objektpunktposition x_O und die zugehörige Kovarianzmatrix. Mit $x_{O,Init}$ wird in (2c) die aus der Initialisierung des Kalmanfilters (z.B. aus den ersten Minuten oder Stunden etc.) gewonnene Ausgangsposition bezeichnet.

Das Kalman-Filter hat den wesentlichen Vorteil, durch die sequentielle Auswertung Rechenzeit zu sparen und online den vollständigen dreidimensionalen Zustandsvektor $(\mathbf{u}_O, \dot{\mathbf{u}}_O, \ddot{\mathbf{u}}_O)$ samt Kovarianzmatrix zur Verfügung zu stellen. Beides sind elementare und bedeutende Vorteile für ein online Kontroll- und Alarmsystem.

Bei einem im online Betrieb laufenden Kalman-Filter wird nach jedem Filterschritt die Wahrscheinlichkeit für den vom Anwender vorgegebenen kritischen Zustand berechnet [8], [9]. Die Alarmwahrscheinlichkeiten werden visuell dargestellt (Abb. 3).

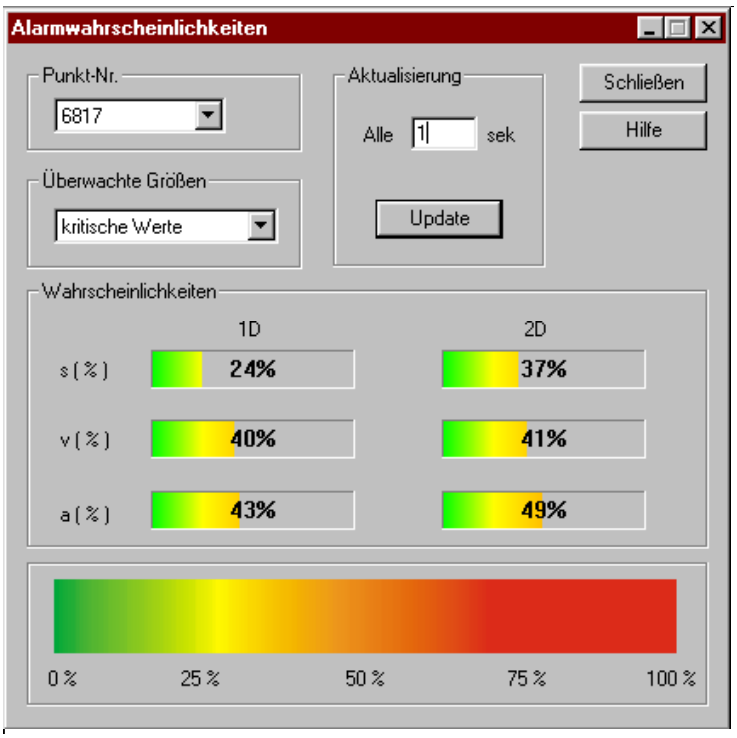

Abbildung 3: Visualisierung der Alarmwahrscheinlichkeiten in GOCA

Wird die vom Benutzer angegebene Wahrscheinlichkeit für einen kritischen Zustand überschritten, so erfolgt über das vonseiten der Firma GeoNav entwickelte Programm *GOCA-Alert* die entsprechende nutzerseitig definierte Alarmierung.

Folgende Alarmarten sind derzeit möglich:

- Meldung per SMS an ein mobiles Telefon
- E-Mail an einen Empfänger
- Ausgabe einer Sequenz an einen seriellen Port
- Steuerung einer Relais-Platine
- Starten eines beliebigen externen Programms.

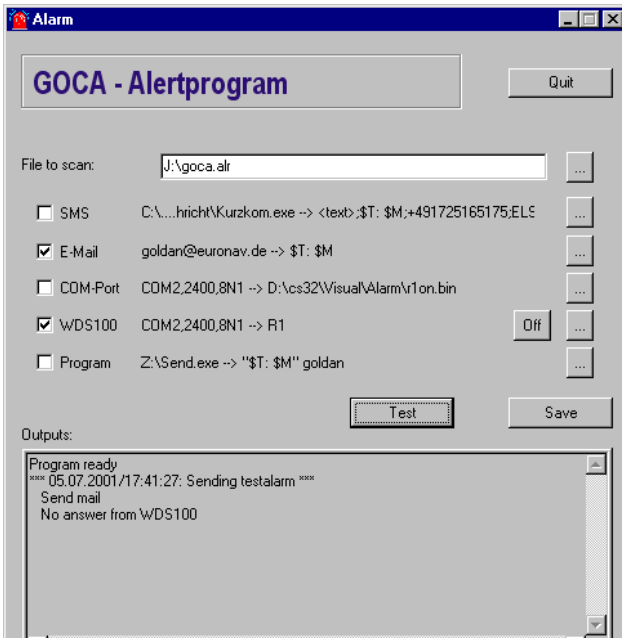

Abbildung 4: Alarmmodul der Firma GeoNav

3. ÜBERWACHUNG DER KOPS-STAUMAUER

3.1 Das Bauwerk

Der Kops-Stausee liegt etwa 2 km westlich von Galtür (Österreich). Die Staumauer Kops wurde in den Jahren 1961-1967 errichtet. Bei der Staumauer handelt es sich um eine weitgespannte, relativ stark gekrümmte Bogenstaumauer, wobei der Felsrücken an der Südflanke durch ein künstliches Widerlager erhöht wurde. Eine Gewichtsmauer, die südlich etwa im rechten Winkel an das künstliche Widerlager anschließt, riegelt das Staubecken im Bereich der seichteren Mulde ab. Die Kronenlänge der Bogenmauer beträgt 400 m, ihre größte Höhe – 122 m, größte Basisbreite – 30 m. Bei der Gewichtsmauer beträgt die Kronenlänge 214 m, größte Höhe – 43 m, größte Basisbreite – 33 m [11].

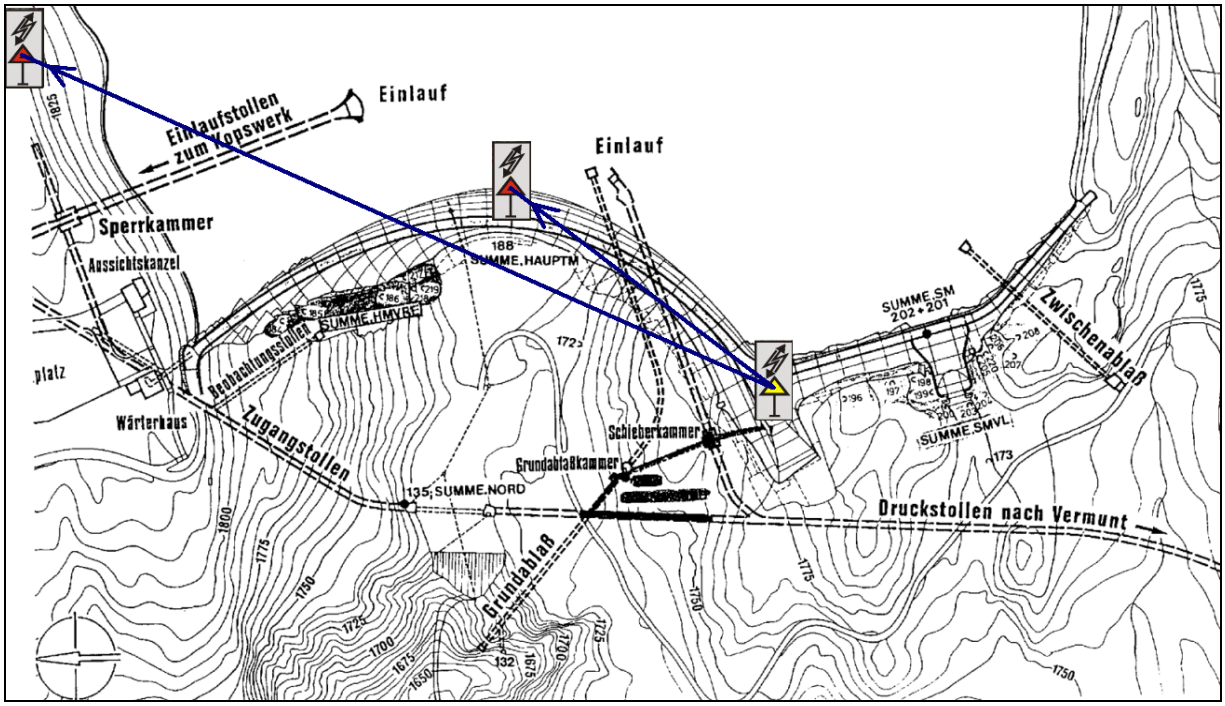

Abbildung 5: Lageplan Kops-Staumauer mit GPS-Beobachtungsdesign. Zwei Objektpunkte x_o: in Mauermitte (GPS-Rover) und im künstlichen Widerlager (GPS-Basisstation). Referenzpunkt x_R (Rover) links auf dem Betriebsbunker.

3.2 Bisherige Überwachungsmethoden

Die Talsperrenüberwachung beruht im wesentlichen auf zwei Säulen:

- die laufende Erfassung, Übertragung und Überprüfung der Messwerte des in der Kops-Staumauer installierten permanent registrierenden Standardinstrumentariums sowie die in regelmäßigen Abständen erfolgenden klassisch geodätischen Kontrollmessungen.
- die wochentags durchgeführte Begehung durch die Sperrenwärter, welche eine visuelle Kontrolle der Sperre durchführen und darüber hinaus Kontrollmessungen bzgl. des Standardinstrumentariums vornehmen.

Abbildung 6: Schwimmlot am künstlichen Widerlager

Die permanent registrierten Daten werden an die zentrale Datensammelstelle des Betreibers weitergeleitet und graphisch und statistisch verarbeitet.
Zu den eingebauten fortlaufend registrierenden Messinstrumenten gehören die hochgenauen Schwimmlote (Abb. 6), welche die Bewegungen der Staumauer in der kritischen West-Ost-Richtung im künstlichen Widerlager der Mauer und im Bereich der Mauermitte überwachen. Die Messdatenerfassung erfolgt alle 15 Minuten vollautomatisch.

3.3 Monitoring mit GOCA

Ende Mai 2001 wurde das System GOCA für die Dauer von 1 Jahr in Kops installiert. Drei GPS-Sensoren befinden sich derzeit im Einsatz – zwei GOCA-Empfänger der Firma GeoNav und ein Trimble-Empfänger der 4600-Serie. Die GPS-Referenzstation wurde im Bereich des künstlichen Widerlagers errichtet, ein Rover im Bereich der Mauermitte (Abb. 7, links). Der zweite Rover erfüllt die Funktion eines Stabilpunktes (Abb. 7, rechts). Die Länge der resultierenden Baselines beträgt ca. 198 m und 500 m (Abb. 5) . Alle zwei Minuten (Δt=2 Min) werden die DGPS-Baselines als Beobachtungen l (1a,b) per Funk von den Empfängern zur GOCA-Zentrale übertragen, die in einem ca. 1 km von der Staumauer entfernten Unterkunftshaus untergebracht ist. Von dort aus kann über Telefonleitung die Fernwartung (Abb. 1) des GOCA-Systems zur Überwachung der Kops-Staumauer durch den Betreiber erfolgen.

Ein Problem für den Betrieb von GPS-Arrays stellen Gewitter dar, da hier zum einen eine Gefährdung der GPS-Empfänger besteht, zum anderen eine Gefährdung des Überwachungs-Betriebes durch gewitterbedingte Stromausfälle resultiert. Daher wurden die GPS-Empfänger jeweils mit einem Blitzschutz ausgestattet. Damit die Messung auch im Falle eines Stromausfalls fortgesetzt werden kann, wird die Stromversorgung durch Batterien gepuffert. Die GOCA-Empfänger (Abb. 2) wurden unzugänglich für den Touristikbetrieb in den Bunkern untergebracht.

Abbildung 7: Kops-Staumauer mit GPS-Sensoren (links: Rover, rechts: Referenzstation)

Abbildung 8:. Einrichtung des Stabilpunktes

3.4 Auswertung der Messungen

Die GOCA Deformationsanalyse Software stellt eine Reihe von Basismodulen für die geometrische Deformationsanalyse der Objektpunktzeitreihen $\mathbf{x}_O(t)$ und von Funktionen $\mathbf{f}(\mathbf{x}_O)$ der Objektpunktpositionen $\mathbf{x}_O$ zur Verfügung [1],[2],[3],[5]. Implementiert sind verschiedene L2-Norm- und L1-Norm-Schätzstrategien und Filter. Ein weiteres Modul der GOCA-Software umfasst die Kalman-Filter-basierte Schätzung der dreidimensionalen Verschiebung, Geschwindigkeit und Beschleunigung der Objektpunkte $(\mathbf{u}_O, \dot{\mathbf{u}}_O, \ddot{\mathbf{u}}_O)$ (2a-d).

Die Koordinaten der Objektpunkte x_O werden für jedes Aufzeichnungsintervall Δt über eine Netzausgleichung bestimmt und führen zu kontinuierlichen Zeitreihen für die Objektpunkte. Gleitende Mittelwerte werden wahlweise im Online- oder Postprocessing-Modus durch Kleinste-Quadrate- oder alternativ durch robuste (L1-Norm, Huber-) Schätzverfahren ermittelt. Im Postprocessing-Modus stehen ebenfalls verschiedene Strategien zur Verfügung.

Die aufgezeichneten GOCA-Messdaten wurden mittels verschiedener Trendfunktionen und Kalmanfilterung analysiert. Die resultierenden Berechnungen wurden anschließend mit den Ergebnissen der Lotungsmessungen verglichen. Betrachtet wurden dabei nur die Bewegungen der kritischen Ost-West-Richtung senkrecht zur Staumauer.

Beim Vergleich der Lotungsmessungen mit den GOCA-Ergebnissen ist zu beachten, dass sich im Bereich des künstlichen Widerlagers die GPS-Antenne ca. 2 m über dem Schwimmlot befindet und somit die GPS-Messung größere Verschiebungsbeträge liefert. In der Mauermitte ist die GPS-Antenne ca. 0,5 m höher als das Schwimmlot. Der entsprechend Effekt geringfügig größerer Verschiebungsbeträge wird auch bereits in [4] beschrieben (siehe auch Prinzipskizze Abb. 9), er ist in gleichem Maße auch entsprechend modellierbar.

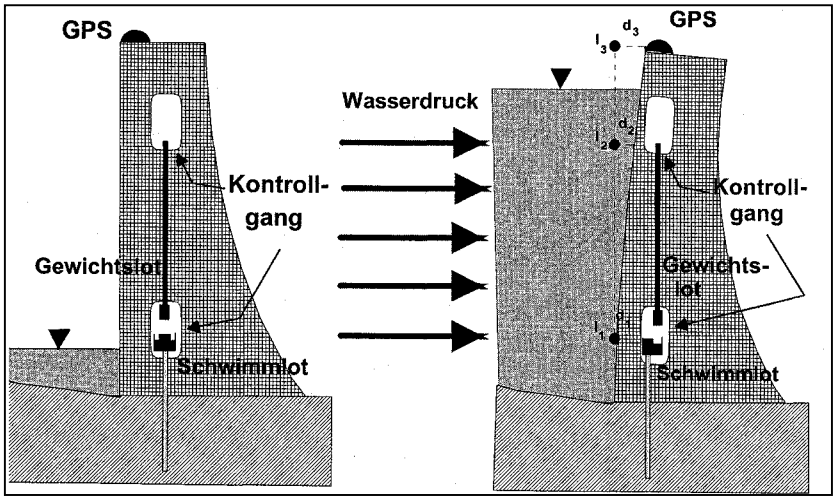

Abbildung 9: Erklärung zur geringen Diskrepanz einer durch Lotungen (d_2) und GPS (d_3) ermittelten Deformation. Abbildung entnommen aus [4]

GPS liefert in jedem Fall absolute Verschiebungen im stabilen Koordinatenrahmen x_R (1a-d), (Abb. 5), so dass auch etwaige zusätzliche Effekte durch Verschiebungen im weiteren Bereich des Untergrunds bei GPS - im Gegensatz zu Schwimmloten - ohne Einfluss auf die ermittelten Verschiebungsbeträge bleiben.

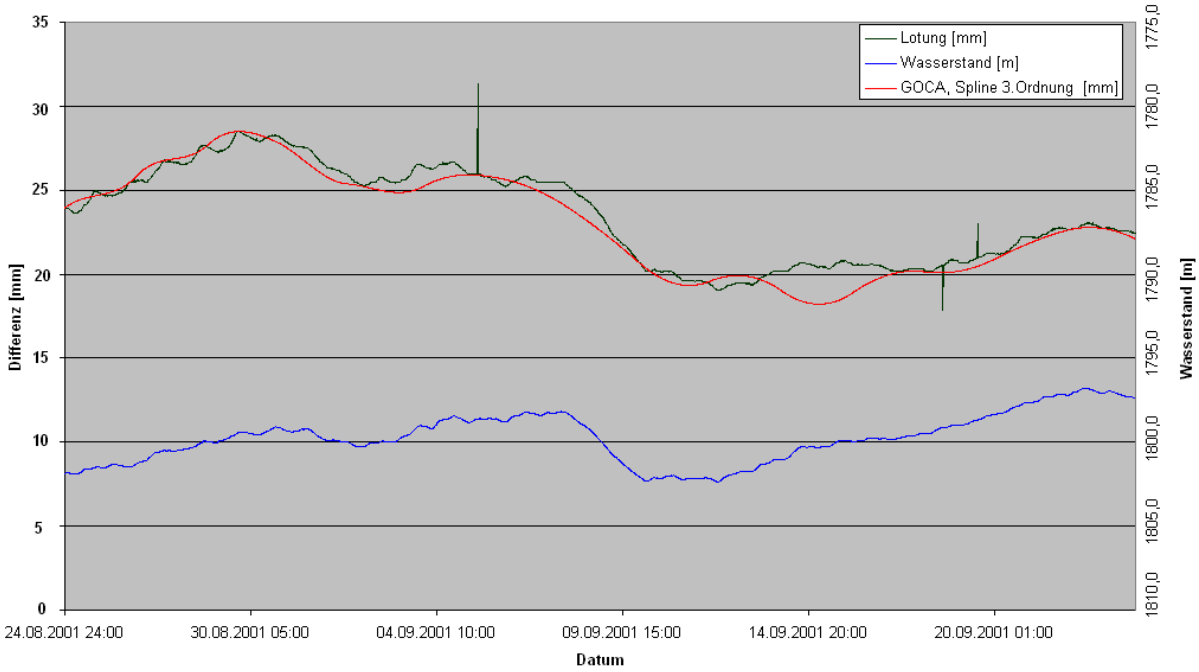

Abbildung 10. Gegenüberstellung der klassischen Lotungsmessungen und der GOCA-Spline-Auswertung (DGPS-Monitoring). Bereich der Mauermitte, Zeitraum 24.08.01-24.09.01

Abb. 10 zeigt eine auf einer Splineschätzung 3. Ordnung basierende Trendermittlung für den Objektpunkt im Bereich der Mauermitte (Abb. 5, 7) zusammen mit den Ergebnissen der Lotungsmessungen und den Wasserständen im Zeitraum vom 24. August bis 24. September 2001. Beim Vergleich der GOCA-Ergebnisse des GPS-Monitoring mit den klassischen Lotungsmessungen zeigt sich eine Übereinstimmung von besser als 1 mm. Erkennbar ist darüber hinaus die hohe Korrelation der Verschiebungswerte mit den Stauhöhen. Abb. 11 zeigt die mit Hilfe des online Kalman-Filter-Modells (2a-d) ermittelten Verschiebungs-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungszeitreihen für den Objektpunkt im Bereich der Mauerkrone über einen Zeitraum von 4 Wochen.

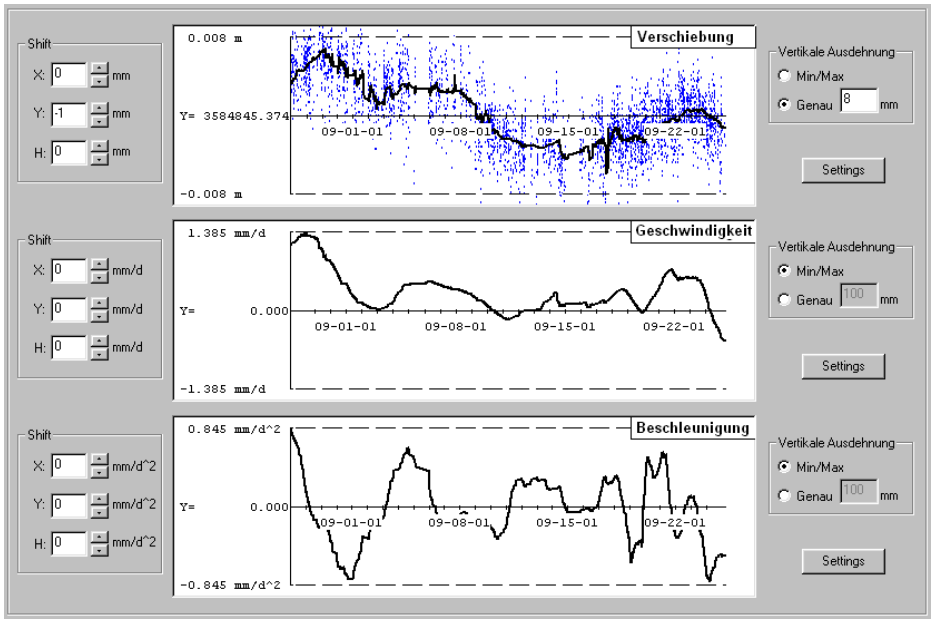

Abbildung 11: Aus dem Kalman-Filter Modell (3a,b) resultierende Verschiebungs-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungszeitreihen für den Zeitraum vom 28. August bis 24. September 2001. Im oberen Fenster sind zusätzlich die Rohdaten eingeblendet.

Abb. 12 zeigt die mit dem gleitenden Mittelwert - als weiterem Standard der GOCA Deformationsanalyse Software - für den im Bereich des relativ stabilen künstlichen Widerlagers befindlichen Objektpunktes ermittelte Überwachungsergebnisse. Die GPS-basierten GOCA-Ergebnisse sind wiederum zusammen mit den Lotungsmessungen und den Wasserständen für den Zeitraum vom 27. August bis 22. September 2001 dargestellt. Auch hier zeigt der Vergleich der GOCA-Ergebnisse mit den Lotungsmessungen eine Übereinstimmung von unter einem mm sowie die erwartungsgemäß hohe Korrelation zwischen den Stauhöhen und den Verschiebungswerten. Abb. 13 zeigt die ebenfalls übereinstimmenden Ergebnisse der Kalmanfilterung (2a-d) für den Widerlager-Objektpunkt (Abb. 5, 7) in einem Zeitraum von 4 Wochen.

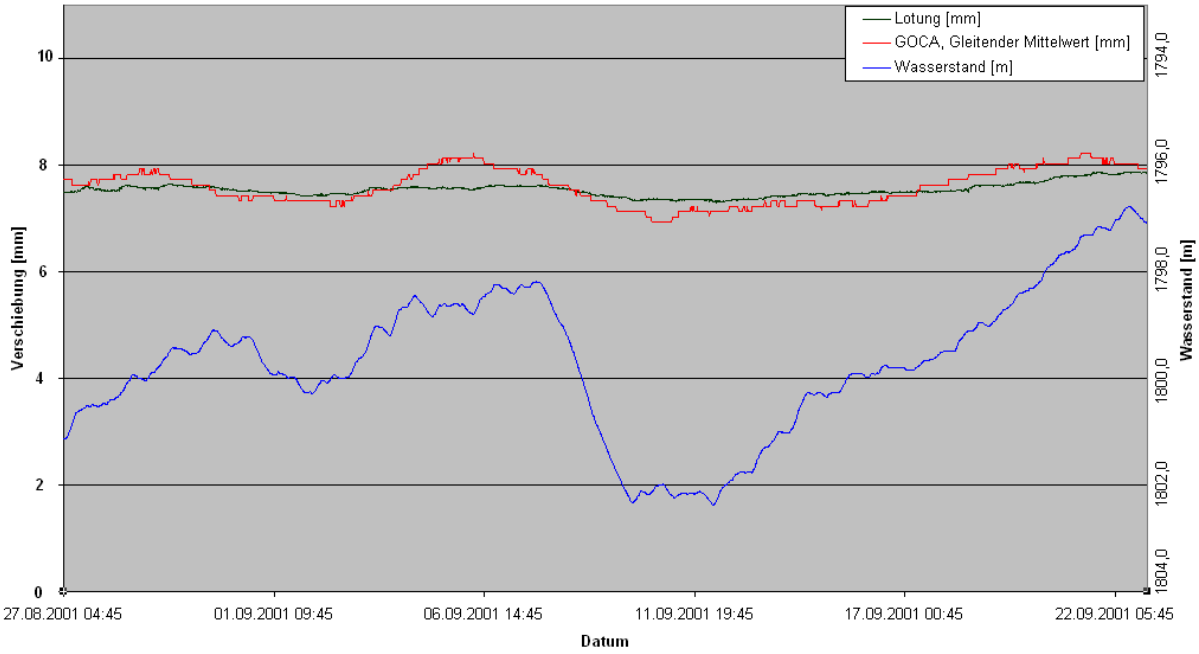

Abbildung 12. Gegenüberstellung der Lotungsmessungen und GOCA-Auswertung. Objektpunkt im künstlichen Widerlager (Abb. 5). Zeitraum 27.08.01-22.09.01

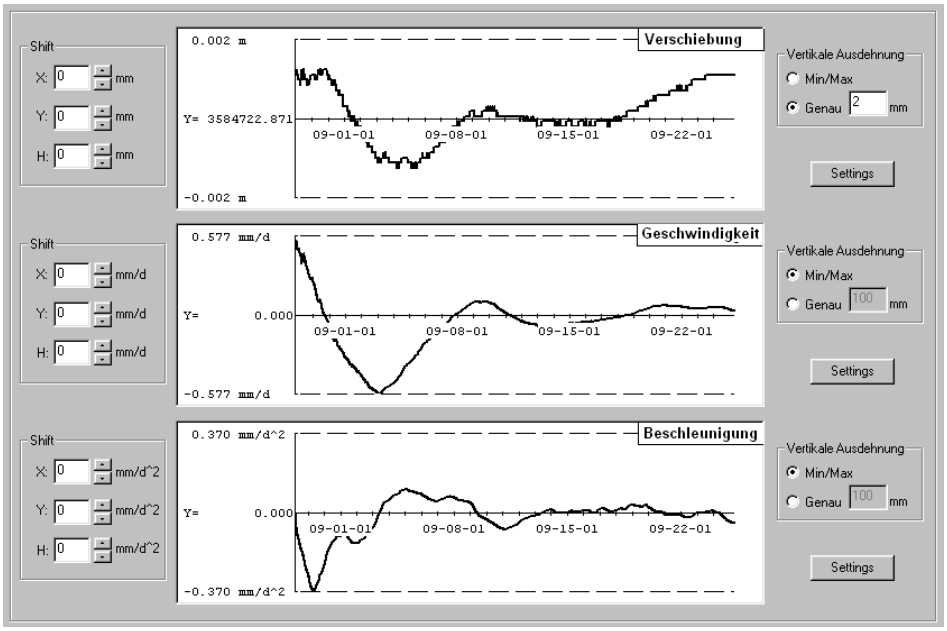

Abbildung 13: Aus dem Kalman-Filter Modell (3a-d) resultierende Verschiebungs-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungszeitreihen für den Zeitraum vom 28. August bis 25. September 2001

4. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Der Beitrag zeigt die Leistungsstandards des GOCA-Systems und dessen praktischen Einsatz am Beispiel der Kops-Staumauer der Illwerke AG, Österreich auf. GOCA leistet über ein Array von GPS-Sensoren ein fortlaufendes Monitoring von Verschiebungen an der Erdoberfläche und erlaubt dabei den Einsatz beliebiger kommerzieller GPS-Hardware. Alternativ und zur Einsparung von Hardwarekosten kann auch der im Rahmen des GOCA-Projektes entwickelte GOCA-Empfänger verwendet werden. Die örtliche GOCA-Zentrale besteht aus einem PC mit der GOCA-Software und einer Kommunikationseinrichtung. Sie kann selbst über einen Fernwartungsmodus betrieben werden, so dass mehrere an unterschiedlichen Orten situierte Projekte zentral überwacht werden können.

Die konzeptionelle Stärke von GOCA beruht auf der Tatsache, dass die Anwendung einer strengen sequentiellen Netzausgleichung mit dem Input von DGPS-Baselines und ihrer Kovarianzmatrizen das statistisch gesicherte und strenge Konzept einer klassischen Deformationsanalyse online bereitstellt. Darüber hinaus werden robuste Schätzer eingesetzt, um die von GOCA durchgeführten Berechnungen, Filterungen sowie die Trendanalysen und die Alarmierung im Bereich der ermittelten Zeitreihen von Objektpunktverschiebungen, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen resistent gegenüber dem Einfluss von Datenfehlern zu machen.

Die derzeitige Weiterentwicklung der GOCA-Deformationsanalyse Software umfasst die Fortentwicklung der Algorithmen zur online Erfassung und mathematischen Modellierung von höherfrequenten Bewegungen, bspw. für die Überwachung von Bewegungen bzw. Schwingungen von Brücken, Turmbauwerken, Windkrafträdern etc. Darüber hinaus erfolgen die Realisierung eines robustern L1-Norm Kalmanfilters, die durchgehende Schätzung und Visualisierung von Genauigkeitsangaben (z.B. Fehlerbändern), sowie die Konzipierung und Realisierung von systemanalyse-orientierten Modellbildungen zur Deformationsanalyse. Ein auf dem L1/L2-Kalmanfilter basierendes GOCA Vorhersage-Modul („GOCA-Predict“), z.B. für die Überwachung von Wasserständen, befindet sich ebenfalls in Entwicklung.

Im vorliegenden Beitrag werden die Ergebnisse der Überwachung der Kops-Staumauer unter permanenter Schätzung des Verschiebungs-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungsfeldes vorgestellt und mit den Messungen der hochgenauen Schwimmlote verglichen. Der Vergleich der GOCA-Ergebnisse, d.h. der aus den ausgeglichenen Einzelpositionen der Objektpunkte abgeleiteten Trendschätzungen und Filterungen, mit den bisherigen Messverfahren zur Überwachung der Staumauer zeigt eine Übereinstimmung des GPS-Monitoring mit dem klassischen Sensorsystem des Schwimmlotes im Submillimeterbereich (< 1 mm). Das Leistungsspektrum von GOCA deckt somit in vollem Umfang das Anforderungsprofil für eine online 3D-Überwachung sicherheitskritischer Bauwerke mit einer entsprechenden Sensitivität im mm-Bereich ab. Dabei kommt der weiteren Flexibilisierung in der GOCA-Systementwicklung auch die gegenwärtig stattfindende Einbindung von Totalstationen als zusätzliche Sensorik bzw. Komponente in den netzausgleichungs-basierten Zustands- und Trendschätzungen der GOCA-Deformationsanalyse Software zugute.

DANK

Das GOCA-Team der Fachhochschule Karlsruhe – University of Applied Sciences bedankt sich bei der Vorarlberger Illwerke AG für die Ermöglichung des GOCA-Testbetriebes auf der Kops-Staumauer und die in diesem Zusammenhang gewährte Unterstützung.

LITERATUR

[1] Kälber, S. und R. Jäger (2000): Realisierung eines GPS-basierten Online Kontroll- und Alarmsystems (GOCA) und Diskussion adäquater geometrischer und systemanalytischer Ansätze zum online Monitoring im Talsperrenbereich. Wissenschaftliche Berichte zum Workshop „Messtechnische Lösungen bei der Überwachung von Talsperren“. Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule Mittweida (FH). S. 63 - 78.

[2] Kälber, S.; Jäger, R. und R. Schwäble (1999): GPS-basierte Online Kontroll - und Alarmsysteme (GOKA). X. Internationale Geodätische Woche in Obergurgl, Österreich, Februar 1999. Institutsmitteilungen, Heft Nr. 18, Institut für Geodäsie der Universität Innsbruck. S. 231-238.

[3] Kälber, S.; Jäger, R. und R. Schwäble (1999b): GPS-based Online Control and Alarm System (GOCA). GPS_Solutions 2(3), Wiley, New York.

[4] Bäumker, M.; Fitzen, H.-P. und D. Backhausen (2000): Dreidimensionale permanente Überwachung der Edertalsperre mit GPS. Ingenieurvermessung 2000, Wittwer, Stuttgart.

[5] R. Jäger and S. Kälber (2001): GPS-based Online Control and Alarm System (GOCA) - A Geodetic Contribution for Hazard Prevention. Proceedings International Conference on Landslides - Causes, Impacts and Countermeasures. Davos, Switzerland, June 17-21. (In: Kühne, Einstein, Krauter, Klapperich, Pöttler (Eds.)), ISBN 3-7739-5969-9 Runge, GmbH, Cloppenburg. S. 261 – 275.

[6] R. Jäger und S. Kälber (2001): GPS-based Online Control and Alarm System (GOCA)". Proceedings Orange, 10th FIG International Symposium on Deformation Measurements. Kalifornien, USA, 19.- 22. März 2001.

[7] Jäger, R. (1997): Ein ISO 9000 Handbuch für Überwachungsmessungen, DVW-Schriftenreihe, Heft Nr. 27, Wichmann Verlag, Karlsruhe.

[8] Schneid, S. (2000): Entwurf und Codierung eines C++-basierten Programmmoduls zur Kalman-Filterung von Deformationsbeobachtungen. Diplomarbeit am Studiengang Vermessung und Geomatik, Fachhochschule Karlsruhe.

[9] Schneid, S. and R. Schwäble (2000): Zustandsschätzung als Basis für Alarmierungskonzepte in der Deformationsanalyse. DVW-Mitteilungen des Landesvereins Baden-Württemberg, Oktober 2000, ISSN 0940-2942, S. 25-35.

[10] Feldmeth, I.; Kälber, S. und R. Jäger (2002): www.fh-karlsruhe.de/iit/goca. GOCA-Homepage.

[11] Stocker, E. (1970): Bericht über die Bauausführung der Staumauer Kops. Festschrift zur Eröffnung des Kopswerkes, Verband der Elektrizitätswerke Österreichs.