



GPS-gestützte 3D-Permanent-Überwachung bewegungs-empfindlicher Bergschadensobjekte

Assessor des Markscheidefachs Dipl.-Ing. Werner Schaefer, Leiter der Abteilung Bergschäden-Markscheiderei, RWE Power AG, Köln

Im rheinischen Braunkohlenrevier verlaufen die stümpfungsbedingten Bodenbewegungen im Regelfall sehr langsam und gleichförmig. Bergschäden können nur dort entstehen, wo geologische Besonderheiten die gleichmäßige Grundwasserabsenkung verhindern. Dies sind bewegungsaktive tektonische Störungen und Auegebiete mit humosen Böden, in denen durch den Bergbau der freie Grundwasserspiegel abgesenkt wurde [1].

Die Schadensobjekte werden häufig mittels Präzisionsnivelements regelmäßig beobachtet, um das Bewegungsverhalten der Gebäude zu erfassen und geeignete Schadensregulierungen vornehmen zu können. Besonders bewegungsempfindliche Bauwerke werden mittels automatischer Messsysteme, zum Beispiel hydrostatische Schlauchwaagen und Lichtwellenleiter, kontinuierlich kontrolliert. Hierbei erhält man jedoch nur eine Bewegungskomponente. Der Aufwand insbesondere für die Beschaffung und Einrichtung derartiger Messsysteme ist beträchtlich.

Im Rahmen eines neunmonatigen Projekts hat RWE Power gemeinsam mit der Fachhochschule Karlsruhe und der Firma GeoNav GmbH, Wunstorf, das GPS-basierende GOCA-Mess- und Auswertesystem (GOCA = GPS-based Online Control and Alarm System; www.goca.info) unter Praxisbedingungen eingesetzt und weiterentwickelt [2, 3].

Die GOCA-Software realisiert online eine auf sequentiellen Ausgleichsstufen basierte Deformationsnetzmodellierung bei klassischer Unterteilung in einen Stabil- und Objektbereich. Mit den Stufen 1 und 2 erfolgt die dreidimensionale Georeferenzierung der Objektpunktkoordinaten als Zeitreihen im Datum der Stabilpunkte (inklusive Stabilpunkttest) sowie deren Visualisierung. In der darauf aufbauenden Deformationsanalyse (Stufe 3) sind wahlweise sowohl kleinste Quadrate als auch robuste Huber- und L1-Norm-Schätzungen implementiert. Im Onlinemodus der Objektpunktdeformationsanalyse stehen die Funktionen gleitender Mittelwert, Verschiebungsschätzung sowie Kalmanfilterung unter Schätzung der Zustandsgrößen Objektpunktverschiebung, -geschwindigkeit, -beschleunigung, deren Visualisierung sowie ein entsprechendes Alarmmanagement zur Verfügung.

Das GOCA-System wird bereits seit längerer Zeit im rheinischen Braunkohlenrevier [4] und auch im Ausland (Morila Goldmines Mali; Rössing Mines Namibia) zur Erfassung von horizontalen Böschungsverformungen erfolgreich eingesetzt. Ferner wird GOCA zur Deformationsanalyse im Steinkohlenbergbau sowie zum Langzeitmonitoring im Gotthard-Tun-

nelprojekt eingesetzt. Auf diesen Erfahrungen aufbauend sollte im Weiteren untersucht werden, ob insbesondere langsame Höhenveränderungen in mm-Größenordnung signifikant erkannt werden (Bewertung der Sensitivität des Systems) und ob der Empfängertyp (L1/L2), die Taktrate sowie die Basislänge Einfluss auf die erreichbare Genauigkeit besitzen.

RWE Power hat gemeinsam mit der Fachhochschule Karlsruhe und der Firma GeoNav GmbH, Wunstorf, das GPS-basierende GOCA-Mess- und Auswertesystem unter Praxisbedingungen getestet und weiterentwickelt. Dabei wurde insbesondere untersucht, ob langsam ablaufende Höhenveränderungen in mm-Größenordnung signifikant erkannt werden.

Das Messsystem bestand aus fünf GPS-Sensoren der Firma Trimble (zwei L2- und drei L1-Empfänger) mit entsprechender Datenfunkeinrichtung und den Software-Komponenten MONITOR für die Sensorsteuerung und Kommunikation sowie GOCA für die Deformationsanalyse. Die unabhängige Überprüfung der GOCA-Ergebnisse zeigte, dass Vertikalbewegungen von 1 bis 3 mm pro Tag signifikant erkannt wurden. Die Zuverlässigkeit des Systems lag zuletzt bei nahezu 100 %.

Mittlerweile ist zur kontinuierlichen Erfassung dreidimensionaler Bodenbewegungen ein GOCA-Messsystem mit sechs L2-Empfängern für den Dauerbetrieb fest installiert worden.

GPS-based 3D Permanent Monitoring of Mining Damage Objects Susceptible to Movement

In tandem with Karlsruhe University of Applied Sciences and the company GeoNav GmbH, Wunstorf, RWE Power has tested and continued the development of the GPS-based GOCA measuring and evaluation system under practical conditions. A focus of investigation was whether slowly developing changes in height of only some millimetres can be recognized clearly.

The measuring system consisted of five GPS sensors manufactured by Trimble (two L2 and three L1 receivers) with a corresponding data radio system and the MONITOR software components for sensor control and communications as well as GOCA for deformation analysis. Independent scrutiny of the GOCA results revealed that vertical movements of 1 to 3 mm per day were detected clearly. At the end, the system's reliability was nearly 100 %.

Meanwhile, a GOCA measuring system using six L2 receivers has been firmly installed for permanent operation to allow the continuous recording of three-dimensional ground movements.

Schlagworte Keywords

GPS
GPS

Verformungs-
messungen
deformation
measurements

Deformations-
analyse
deformation
analysis

Bergbaubedingte
Boden-
bewegungen
mining-induced
ground movements

Außerdem sollten Aussagen über die Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit des Messsystems getroffen werden.

Das Messsystem bestand aus fünf GPS-Sensoren der Firma Trimble (zwei L2- und drei L1-Empfänger) mit entsprechender Datenfunktseinrichtung und den Software-Komponenten MONITOR für die Sensorsteuerung und Kommunikation sowie GOCA für die Deformationsanalyse. Per Telefonmodem war ein Zugriff auf die so genannte GOCA-Zentrale möglich. Hierüber erfolgte eine Fernwartung beziehungsweise Fehleranalyse seitens der Projektverantwortlichen FH Karlsruhe und Firma GeoNav sowie eine Übertragung von Messergebnissen an den Arbeitsplatz in der Zentrale Köln der RWE Power AG.

Die fünf Empfänger wurden vor Ort fest installiert. Strom- und Telefonanschluss waren vorhanden. Ein sechster Empfänger (L1) wurde temporär für vier Wochen mit Batterie-Stromversorgung eingebunden. Der größte Abstand zwischen Referenzstation und Rover betrug 1,1 km, die maximale Basislänge 1,7 km.

Die Hardware wurde ohne größere Schwierigkeiten vor Ort eingerichtet. Die Registrierung und Verarbeitung der Messdaten sowie ihre Auswertung im Büro erfolgte von Beginn an ebenso weitgehend unproblematisch. In den ersten vier Monaten lag die Verfügbarkeit des Systems lediglich bei circa 30 bis 40 %. Die Ausfälle waren in diesem Zeitraum meist auf Probleme mit der Datenfunkverbindung und auf unregelmäßige Stromausfälle in der Umgebung der Industrieanlage zurückzuführen. Die Abstürze nach den Stromausfällen mussten jeweils durch manuelles Hochfahren des Rechners und händisches Einschalten der Sensoren behoben werden.

Nach Austausch der defekten Komponenten der Datenfunkverbindung und Aktualisierung der Steuerungssoftware steigerte sich die Verfügbarkeit des GOCA-Systems in den letzten fünf Monaten des Projektes auf circa 80 bis 90 %. Die Gründe für die Systemausfälle waren ein defektes Netzteil des GOCA-Rechners und eine unvorhergesehene Stromabschaltung. Heute – im Praxiseinsatz – liegt die Verfügbarkeit nach weiteren Verbesserungen mittlerweile bei nahezu 100 %.

Die 3D-Bewegungskomponenten der Rover erhielt man nach einer statistischen Verschiebungsschätzung für verschiedene Zeiträume. Die Taktrate für die Registrierung der Positionen wurde zunächst auf 30 Minuten eingestellt, das heißt alle 30 Minuten wurde der gleitende Mittelwert für die x-, y- und z-Koordinaten ermittelt und weiterverarbeitet. Später wurde die Taktrate auf fünf Minuten

Tabelle 1. Messergebnisse der Nivellements und der GOCA-Verschiebungsschätzungen.

Zeitraum	Taktrate	Rover	Höhenunterschied [m]		Differenz [m]
			GOCA	Nivellement	
12.12.02 bis 20.03.03	30 min	Dick 1	-0,0037	-0,0045	-0,0008
		Dick 2	-0,0003	-0,0036	-0,0033
		Dick 3	+0,0015	+0,0004	-0,0011
		Turb	+0,0029	+0,0023	-0,0006
		Mittel			0,0015
21.03.03 bis 12.06.03	5 min	Dick 1	+0,0027	+0,0020	-0,0007
		Dick 2	+0,0021	+0,0024	+0,0003
		Dick 3	+0,0023	+0,0023	0,0000
		Turb	+0,0037	+0,0022	-0,0015
		Mittel			0,0005

eingestellt. Die Ergebnisse der Verschiebungsschätzung wurden kontrolliert durch Präzisionsnivellements. Außerdem war eine unabhängige Prüfung der Messergebnisse möglich durch definierte Verschiebungen (Höhe und Lage) eines Rovers auf einem Verschiebeschlitten.

Die Tabelle 1 gibt für zwei Langzeiträume die Messergebnisse der Nivellements und der GOCA-Verschiebungsschätzungen wieder.

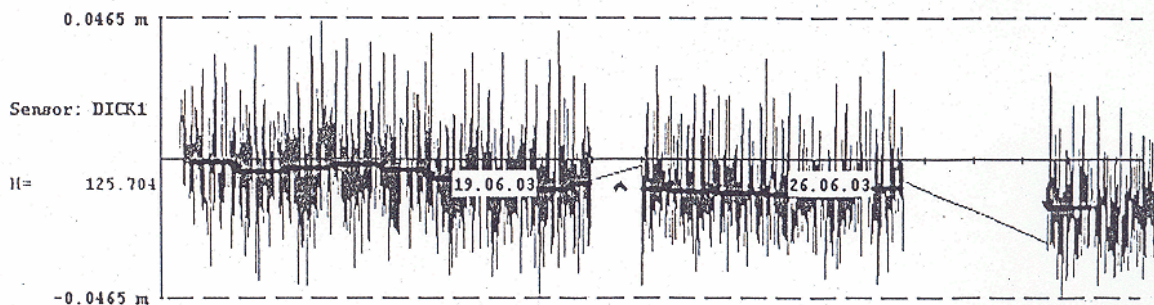
Die Differenzen zwischen den Messergebnissen beider Messmethoden von im Mittel 1,5 mm beziehungsweise 0,5 mm zeigen zum einen eindrucksvoll die sehr gute Höhengenaugkeit des GOCA-Messsystems. Zum anderen ist auch erkennbar, dass die Verringerung der Taktrate von 30 auf 5 Minuten zu einer deutlichen Genauigkeitssteigerung geführt hat.

Die Kurzzeit-Untersuchung erfolgte anhand manueller Vertikalverschiebungen eines Rovers mittels eines Kurbelaufsatzes. Dabei wurden Höhenveränderungen von 0 bis 3 mm pro Tag innerhalb von 14 Tagen simuliert. Die Rohdaten, der gleitende Mittelwert und die Tagesoffsetschätzung der Höhe für den Zeitraum dieser Untersuchung sind im Bild 1 abgebildet.

Ein Vergleich der Tagesoffsetschätzung mit den Soll-Werten ergab eine durchschnittliche Differenz von 1,0 mm bei einer Streuung von +2,5 mm bis -2,2 mm für die Tageswerte und bestätigte damit die guten Ergebnisse der Langzeitbeobachtungen.

Die Analyse der Messergebnisse beziehungsweise der Verschiebungsschätzungen mit L1- und L2-Empfängern ergab, dass bei dieser konkreten Messkonfiguration die L2-Empfänger eine um den Faktor ca. 1,7 höhere Genauigkeit liefern. Die Verschiebungsschätzung einer Messkampagne mit einer Taktrate von 5 Minuten besitzt im Vergleich zur Taktrate

Bild 1. Rohdaten, gleitender Mittelwert und Tagesoffsetschätzung für die Höhenkomponente eines Beobachtungspunkts für einen Zeitraum von 14 Tagen.



von 30 Minuten eine um den Faktor 1,5 verbesserte Genauigkeit.

Das Projekt konnte in allen Punkten erfolgreich abgeschlossen werden. Mit GOCA ist eine Mannlose Überwachung von Bewegungsabläufen „rund um die Uhr“ möglich. Das Messsystem mit sechs L2-Empfängern ist mittlerweile für den Dauerbetrieb installiert worden. Zuvor wurden an der Hard- und Software Verbesserungen vorgenommen. Dies betrifft unter anderem den Einbau der unterbrechungsfreien Stromversorgung aller Komponenten sowie eine Optimierung der Auswertesoftware (Automatisierte online Verschiebungsschätzung).

Vorgesehen ist die Übertragung der geschätzten Koordinaten in die eigene BEA-Datenbank, um die vorhandenen Auswertemodule zur Darstellung und Analyse von Bodenbewegungen zu nutzen.

Quellennachweis

1. Schaefer, W.: Bodenbewegungen und Bergschadensregulierung im rheinischen Braunkohlenrevier. 42. Wissenschaftliche Tagung des Deutschen Markscheider-Vereins, Cottbus, 1999.
2. Kälber, S.; Jäger, R.: Realisierung eines GPS-basierten Online Control and Alarm Systems (GOCA) und Diskussion adäquater geometrischer und systemanalytischer Ansätze zum online Monitoring im Talsperrenbereich. Wasserwirtschaft – Zeitschrift für Wasser und Umwelt 91 (2001), Heft 2. Vieweg Verlag: Stuttgart 2001. ISSN 0043-0978, S. 84 - 99.
3. Feldmeth, I.; Jäger, R.; Zischinsky, R.: GPS-based Online Control and Alarm System (GOCA) – Leistungsstandards des GOCA-Systems, praktischer Einsatz am Beispiel Staumauer Kops (Vorarlberger Illwerke AG, Österreich) und Weiterentwicklungen. Chesi/Weinold (Hrsg.): 12. Internationale Geodätische Woche, Obergurgl, 2003. Wichmann Verlag: Heidelberg 2003. ISBN 3-87907-401-1, S. 202-206.
4. Bulowski, T.: Kontinuierliche Überwachung von Tagebauböschungen mit dem System GOCA. 43. Wissenschaftliche Tagung des Deutschen Markscheider-Vereins, Trier, 2001.