

Reiner Jäger, Manuel Oswald und Peter Spohn

VirtualGOCA – Sensordatengenerierung zur Modell- und Softwarevalidierung sowie zur Planung und Analyse von Geomonitoringszenarien in virtuellen Geosensornetzwerken

Das Softwarepaket VirtualGOCA steht an erster Stelle der Geomonitoringkette mit den vier Komponenten Datenerfassung, Modellierung, Reporting und Reaktion. GoogleEarth®-unterstützt werden virtuelle Sensorrohdaten generiert und so die effiziente und kostengünstige Entwicklung von Monitoring-Software wie GOCA oder MONIKA ermöglicht. Die gesamte viergliedrige Monitoringkette kann ausgetestet und optimiert werden und es können „Proof-of-Concept-Studien“, Planungen sowie die Validierung von Software und Verfahrensabläufen in Geomonitoring-Szenarien erfolgen. Die Funktionalität von VirtualGOCA wird anhand der Generierung virtueller Sensordaten für die im Gotthard-Massiv gelegenen Staudämme Curnera, Nalps und Santa Maria aufgezeigt. Es wird die weitere Datenprozessierung und Deformationsanalyse in einem einheitlichen 3-D-Koordinatensystem mit den entsprechenden Modulen der Software GOCA entlang der kompletten Geomonitoringkette vorgestellt.

1 Motivation zur Entwicklung von VirtualGOCA

Interdisziplinär erfolgt die Aufgliederung des Geomonitoring (Environmental Monitoring) in die Komponentenkette Datenerfassung (Sensornetzbetrieb, Datenkommunikation), Modellierung (Berechnung, statistische Bewertung von

Zustandsgrößen, Vorhersagen, Erkennung von Prozessänderungen), Reporting (Protokollierung, Web-/Visualisierung) und Reaktion (Umsetzung eines Alarmierungsplans). Zentrale Zustandsgröße der Modellierungskomponente im geodätischen Geomonitoring ist der aus den Sensordaten abzuleitende dreidimensionale Verschiebungsvektor u der Objekt-

punkte in einem einheitlichen Referenzpunkt-Koordinatensystem (**Bild 1**).

Die durchgehende Automatisierung des Geomonitoring und die Vielfalt geodätischer und geotechnischer Sensoren eröffnen gegenwärtig neue Leistungspotenziale in Modellbildung und Vorhersage. Sie setzen im Kernbereich der Modellierung aber auch neue Anforderungen, wie z. B. die räumliche und zeitliche Skalierbarkeit der Geosensornetzwerke, die Skalierbarkeit bezüglich der Kombination unterschiedlicher geodätischer und geotechnischer Sensortypen („Integrierte Deformationsanalyse“ oder „Systemanalyse“ [2], [4], [5]) sowie an die Systemzuverlässigkeit im Online-Monitoring. Die klassische geodätische Netzausgleichung im Gauß-Markov-Modell (GMM) ([3], [6]) und dessen Erweiterung zur integrierten Zustandsschätzung bzw. Deformationsanalyse können dieses Anforderungsprofil nicht ohne ein Redesign sowie Neuentwicklungen im Bereich mathematischer Modelle bedienen.

Die Software VirtualGOCA soll dazu beitragen, diese Entwicklungen effizient und kostengünstig zu unterstützen. VirtualGOCA steht am Anfang der Geomo-

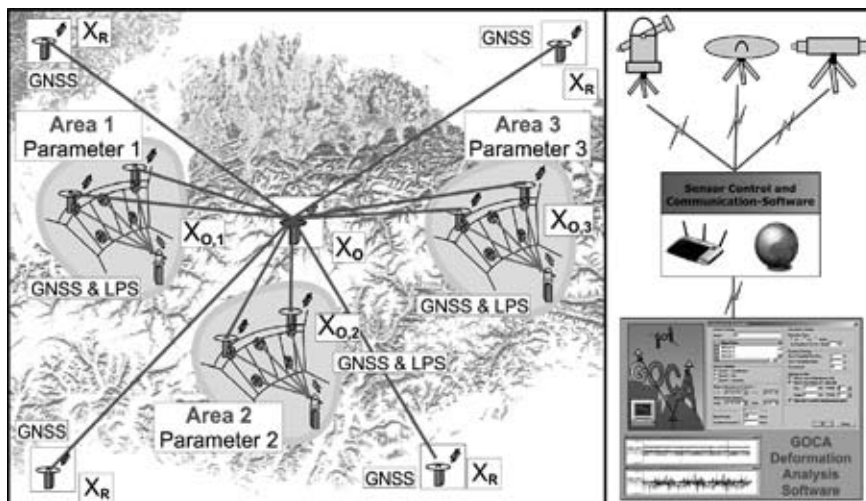


Bild 1: Skalierbarkeit von Sensordesign und Gebietsausdehnung. GNSS- und LPS-Sensoren zur Verknüpfung der Objektgebiete x_o in einem einheitlichen Referenzsystem x_R

nitoringkette, der Datenerfassung, und generiert – mit Google-Earth zur realitätsstreuem Vorgabe der Sensorpositionen – die Rohdaten virtueller geodätischer Sensoren (Bild 3). Dies sind GNSS-Baselines, Schrägstrecken, Richtungen, Zenitdistanzen und Höhenunterschiede, welche an der neutralen ASCII-basierten Dateninhaltschnittstelle des GKA-Formats [1] bereitgestellt werden.

2 Sensordatenberechnung und Bereitstellung in VirtualGOCA

2.1 Grundlagen von Geometrie- und Schwereräum

Die Basis für die Generierung von Beobachtungsdaten für GNSS-Sensoren (GNSS = Global Navigation Satellite Systems, wie GPS, GLONASS und das künftige europäische GALILEO) und LPS-Sensoren (LPS: „Local Positioning System“, wie Totalstationen (TPS), und Schlauchwaagen) für das geodätische Geomonitoring (Bild 1) bildet die durch die Anbindung von GoogleEarth mögliche direkte Georeferenzierung der Sensorpositionen (Bilder 2 und 3) im globalen erdfesten Bezugsrahmen (e). Basis hierfür sind die geozentrischen kartesischen Koordinaten $P(x,y,z)$ bzw. die auf das GRS80-Ellipsoid bezogenen geographischen Koordinaten $P(B,L,h)$ der Netzpunkte (Bild 2). Die Höhenkomponente h wird aus einem globalen DGM und einem Geopotenzialmodell nach (4) ermittelt. Ausgehend von den Netzpunktkoordinaten $P(x,y,z)$ und der Vektorbilanz $x_i + i + l_{ij} - t - x_j = 0$ (Bild 2) erfolgt die Generierung des Totalstations-Beobachtungsvektors l_{ij} im Geometrie- und Schwereräum als:

$$l_{ij}^{LAV,i} = \begin{bmatrix} \Delta u \\ \Delta v \\ \Delta w \end{bmatrix}_{ij}^{LAV,i} \quad (1a)$$

$$l_{ij}^{LAV,i} = D_i(\varphi_i, \lambda_i) \cdot \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix}_{ij}^{ECEF} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -i \end{bmatrix}^{LAV,i} + \quad (1b)$$

$$D_i(\varphi_i, \lambda_i) \cdot D_j(\varphi_j, \lambda_j)^T \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ t \end{bmatrix}^{LAV,j}$$

Mit LAV (Local Astronomical Vertical) werden das an die windschiefen Schwervektoren g_i bzw. g_j (Bild 2) geknüpfte loka-

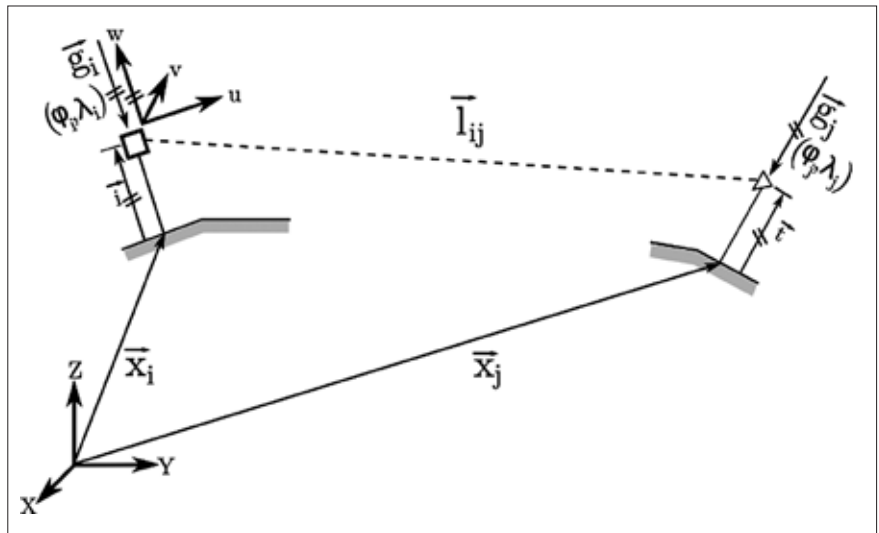


Bild 2: Beobachtungsvektor l_{ij} im Geometrie- und Schwereräum im Szenario einer Totalstationsmessung mit Instrumentenhöhenvektor i und Reflektorhöhenvektor t

le Stand- bzw. Zielpunktsystem indiziert. Die u -Achse des jeweiligen LAV-Systems zeigt nach Norden, die v -Achse nach Osten, die w -Achse mit der konventionell rechtsdrehenden Matrix D_e^{LAV} (2a) nach unten. Für die vom erdfesten System (e) in das LAV rotierenden Drehmatrizen D_i und D_j (1b) und die dort jeweils auftretenden Lotrichtungparameter φ und λ gilt (Bild 2):

$$D_e^{LAV} = \begin{bmatrix} -\cos \lambda \cdot \sin \varphi & -\sin \lambda \cdot \sin \varphi & \cos \varphi \\ -\sin \lambda & +\cos \lambda & 0 \\ \cos \lambda \cdot \cos \varphi & \sin \lambda \cdot \cos \varphi & \sin \varphi \end{bmatrix} \quad (2a)$$

mit

$$\varphi = \arctan \frac{-W_z}{\sqrt{W_x^2 + W_y^2}} \quad (2b)$$

$$\lambda = \arctan \left(\frac{W_y}{W_x} \right) \quad (2c)$$

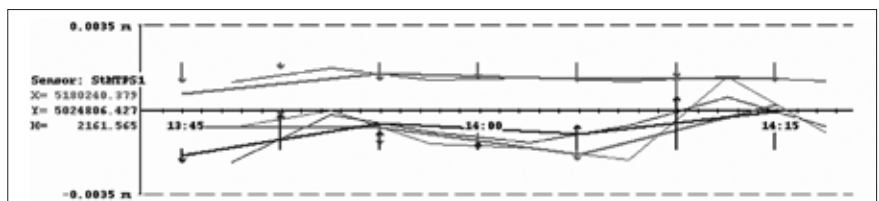
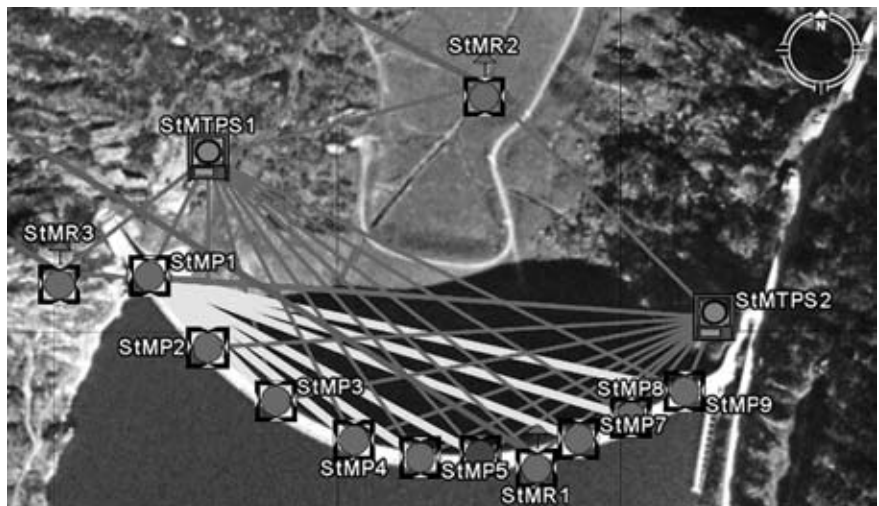


Bild 3: Designausschnitt Stausee Santa Maria mit GNSS-Baselines, Totalstationsmessungen und Schlauchwaagen (oben); Objektpunktzeitreihe mit Moving-Average-Ausgleichung und GOCA-Verschiebungsschätzung für ObjektstMTPS1 (unten)

Die Eingangsparameter für das Gravitationspotenzial W und dessen partielle Ableitungen zur Berechnung der Lotrichtungsparemetern (φ_i, λ_i) und (φ_j, λ_j) gemäß Gl. (2b) und (2c) sind jeweils die der Kippachs- bzw. der Reflektorposition $(B, L, h + i)_i$ bzw. $(B, L, h + i)_j$ zugeordneten Kugelkoordinaten dieser Netzpunkte. In VirtualGOCA werden für W in Gl. (2b) und (2c) die Gravitationspotenzialmodelle EGM08 und EGM2008 verwendet.

2.2 Erzeugung von TPS- und GNSS-Sensordaten in VirtualGOCA

Mit den Komponenten $(\Delta u, \Delta v, \Delta w)$ des an der Kippachse der Totalstation (TPS) ansetzenden Beobachtungsvektors I_{ij} (Bild 2) errechnen sich Raumstrecke s_{ij} , Richtung r_{ij} und Zenitdistanz z_{ij} zwischen P_i und P_j – als die unmittelbaren Sensorrohdaten der betreffenden Totalstation (TPS) – über die Gl. (1a), (1b) und (2a) bis (2c) als:

$$s_{ij} = \sqrt{\Delta u^2 + \Delta v^2 + \Delta w^2} \quad (3a)$$

$$r_{ij} = \arctan\left(\frac{\Delta v}{\Delta u}\right) - o_i \quad (3b)$$

$$z_{ij} = \arctan\left(\frac{\sqrt{\Delta u^2 + \Delta v^2}}{-\Delta w} - \frac{s_{ij}}{2R}\right) \cdot k \quad (3c)$$

Die Orientierungsunbekannte o_i und der Refraktionskoeffizient k bedeuten in Gl. (3b) und (3c) einen freien bzw. festen Zusatzparameter z . Modellspezifisch können zu den Hauptparametern der Netzpunktkoordinaten x noch weitere Zusatzparameter z , z. B. ein Maßstabsfaktor bei den Strecken in Gl. (3a), in die GMM der Ausgleichungsstufen des geodätischen Geomonitoring (s. Kapitel 3) hinzutreten. Die konsistent im Geometrie- und Schwerefeld erzeugten TPS-Daten gemäß Gl. (3a) bis (3c) sind bei Modell- und Softwareentwicklungen auch zur Verifizierung von Reduktionen, wie z. B. der Lotabweichungsreduktionen bei Richtungen, geeignet.

Die Modellierung von Höhenunterschieden ΔH_{ij} für Nivelliere oder Schlauchwaagen als Sensordaten erfolgt über die Normalhöhen der Sensorpositionen P_i und P_j nach der Theorie von Bruns und Molodenski als:

$$\Delta H_{ij} = H_j - H_i = (h_j - N_j) - (h_i - N_i) \quad (4)$$

$$= (h_j - \left(\frac{(W-U)_p}{\gamma_Q}\right)_j) - (h_i - \left(\frac{(W-U)_p}{\gamma_Q}\right)_i)$$

Mit U wird das GRS80-Referenzpotenzial und mit dem Index Q in Gl. (4) der jeweils iterativ zu berechnende sogenannte Telluroidpunkt bezeichnet.

Die Positionen der Basis- und Roverstationen x_{Base} bzw. x_{Rover} stehen bei der Simulation von RTK bzw. Near-Online prozessierten RINEX-Daten direkt über die Basisgrößen der Netzpunktpositionen $P(x,y,z)$ bereit. Für die GNSS-Baselinevektoren als Sensordaten gilt damit:

$$b = [\Delta x, \Delta y, \Delta z]^T = x_{\text{Rover}} - x_{\text{Base}} \quad (5)$$

Ausgehend von in GOCA-Virtual vorgebaren unterschiedlichen Lagegenauigkeiten in Nord-Süd (N), Ost-West (E) und Höhe (h) ermittelt sich die entsprechende

Kovarianzmatrix für b .

3 VirtualGOCA-Beispiel und Auswertung/Modellierung mit GOCA

Die Weiterverarbeitung realer bzw. der seitens VirtualGOCA bereitgestellten virtuellen GNSS- und LPS-Daten basiert in der GOCA-Software [1] auf dem offenen ASCII-basierten Sensordatenschnittstellenformat „GKA“ [1] und erfolgt in einem Ausgleichungskonzept von drei aufeinanderfolgenden Gauß-Markov-Modellen (GMM).

Reiner Jäger, Manuel Oswald and Peter Spohn

VirtualGOCA – Sensordata Generation for a Model/Software validation and the Planning and Analysis of Geomonitoring Scenarios in Virtual Geosensor networks

The software VirtualGOCA is placed at the start of a geomonitoring chain, which is composed of the components data acquisition (geosensor network and data communication), modelling (computation of state variables, prediction, detection of process changes), reporting (protocols, virtual sensor modelling, web-/visualization) and reaction (alerting measures). Supported by Google-Earth®, VirtualGOCA generates virtual sensor data. In that way it enables an efficient and essentially cost-reduced development of monitoring software like GOCA or MONIKA. Based on VirtualGOCA the complete geomonitoring chain can be tested out and optimized. Further the “proof-of-concept” of projected geomonitoring scenarios can be provided, as well as the validation of geomonitoring software and of a correct work of the process flow. The functionality of VirtualGOCA is shown by the generation of virtual sensor-data for the three dams Curnera, Nalps und Santa Maria in the Switzerland Gotthard massiv. The data processing and deformation analysis in a unique 3D coordinate frame, using the respective GOCA software modules for the complete above geomonitoring chain is further shown.

Райнер Йегер, Мануэль Освальд и Петер Шпон

VirtualGOCA – генерирование сенсорных данных для модельной и программной валидации, а также планирования и анализа сценариев геомониторинга в виртуальных геосенсорных сетях

Программная разработка VirtualGOCA стоит на первом месте в сети геомониторинга и имеет четыре составляющих: сбор и регистрация данных, моделирование, отчетность и реакция. Программой «GoogleEarth®-unterstützt» генерируются исходные виртуальные сенсорные данные, что позволяет осуществить эффективную и экономичную разработку программ для мониторинга, таких как GOCA или MONIKA. Вся мониторинговая цепь, состоящая из четырех элементов, может быть апробирована и оптимизирована. Это позволяет провести исследования в отношении проверки подтверждения концепции, планирование, а также валидацию программного обеспечения и последовательности стадий процесса в сценариях геомониторинга. Функциональность VirtualGOCA определяется на основе генерирования виртуальных сенсорных данных для расположенных в горном массиве Готтхард набросных плотин Курнера, Налпс и Санта Мария. При этом производится дальнейшая обработка данных и анализ деформации в единой трехмерной системе с соответствующими модулями программы GOCA вдоль всей цепи геомониторинга.

Die GMM der GOCA-Software sollen kurz erläutert werden, für weitere Details dieser Ausgleichungsmodelle wird auf [4], [5] und [6] verwiesen: Das GMM der Stufe 1 der GOCA-Deformationsanalysesoftware realisiert die Initialisierung des 3-D-Referenzpunktrahmens x_R (Bild 1) und der zugehörigen Kovarianzmatrix C_{xR} in strenger Netzausgleichung im Datum der Referenzpunkte. Sensordaten-Input sind die vorliegenden GNSS-Baselinevektoren, Totalstationsmessdaten (Schrägstrecken, Richtungen, Zenitdistanzen) sowie direkte Höhenunterschiede (Nivelliere, Rotationslaser-basierte Systeme) sowie solche aus Schlauchwaagen. Das GMM der Stufe 2 in GOCA realisiert die fortlaufende Online-Ausgleichung der GNSS gemäß Gl. (5) sowie der terrestrischen LPS-Daten (Gl. (3a) bis (3c) und (4)) unter 3-D-Georeferenzierung der Objektpunkt-Einzelpositionen x_O im Datum der Referenzpunkte x_R (Bild 1).

Basis für die daran anknüpfende GMM-Stufe 3, der eigentlichen Deformationsanalyse, sind die in Stufe 2 georeferenzierten Objektpunktpositionen x_O (6) und ihre Kovarianzmatrizen C_{xO} . Diese werden als sogenannte FIN-Daten im GOCA-Output zur Verfügung gestellt. Die Online-GOCA-Ausgleichungsstufe 3 liefert aufbauend auf (x_O, C_{xO}) verschiedene Deformationsanalysezustands- und Vorhersageschätzungen. Dazu gehören gleitender Mittelwert, Verschiebungsschätzung (Bild 3, unten), Kalmanfilterung [5] von Verschiebungen, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen der Objektpunkte sowie Kalmanfilter-basierte Vorhersagen von Verschiebungen u [5]. Diese Ergebnisse werden als MVE- (Moving-Average), SHT- (3-D-Verschiebung) bzw. KAL- (3-D-Kalmanfilter) sowie VHS- (3-D-Vorhersage) Daten im ASCII-Format für die weiteren Komponenten (Reporting, Reaktion und Alarmierung) der Geomonitoringkette bereitgestellt.

Wird im Deformationsmodellierungsschritt (GOCA-Ausgleichungsstufe 3) ein definierter kritischer Deformations- oder Vorhersagezustand festgestellt, so generiert GOCA entsprechende Alarmierungsdateien (*.ALR).

Bild 3 oben zeigt einen Ausschnitt des Stausees Santa Maria des für das Gotthard-Massiv mit VirtualGOCA generierten Geomonitoring-Szenarios für GNSS- und LPS-Daten. Das Gesamtszenario umfasst gemäß Bild 1 alle im Wirkungsbereich des Gotthardtunnelbaus gelegenen Stauseen Curnera, Nalps und Santa Maria. Diese sind als Objektbereiche x_O an das überge-

ordnete GNSS-Netz x_R angeknüpft. Die Bereitstellung der Sensordaten kann als Echtzeit-Simulation oder über einen vordefinierten Zeitraum ad hoc erfolgen. Bild 3 unten zeigt die aus der GOCA-Software in der Ausgleichungsstufe 2 resultierende 3-D-Objektpunktzeitreihe (FIN-Output-Datei) für den Objektpunkt x_O StMTPS1:

$$x(t)^T = (X(t), Y(t), H(t)) \quad (6)$$

Hinsichtlich weiterer Details der mathematischen Modelle, der sequentiellen GMM sowie der statistischen Teststrategien der GOCA-Ausgleichungsstufen wird auf Jäger et al. [4] und [5] verwiesen.

4 Resümee

Der Beitrag behandelt die mathematischen Modelle zur Erzeugung virtueller online Sensordaten für GNSS- und LPS-Sensorik im Geometrie und Schwereräum und die entsprechende Softwareentwicklung VirtualGOCA. Die Funktionalität wird anhand der Prozessierung der das die drei Staudämme Curnera, Nalps und Santa Maria umfassende Geomonitoringnetz „Gotthard-Massiv“ mit VirtualGOCA-generierten Sensordaten mit der netzausgleichungsbasierten Deformationsanalysesoftware GOCA im Modellierungsschritt aufgezeigt. Mit der GoogleEarth-unterstützten Bereitstellung konsistenter Sensorrohdaten für skalierbare Geomonitoring-Arrays an beliebigem Ort ist VirtualGOCA für Softwareentwicklungen, zur Planung von Geomonitoring-Arrays und zur unabhängigen Leistungsbemessung aller Komponenten der Geomonitoring-Kette, für Benchmarktests sowie zur Zertifizierung von Geomonitoringsystemen geeignet.

Hinweis

Dieser Beitrag stellt die schriftliche Fassung des Vortrages beim VII. Mittweidener Talsperrentag am 5. und 6. Mai 2010 dar und wird in Kooperation mit dem Sensorikzentrum Mittelsachsen e. V. wiedergegeben.

Autoren

Prof. Dr.-Ing. Reiner Jäger
Dipl.-Ing. (FH) Manuel Oswald
Dipl.-Ing. (FH) Peter Spohn

Hochschule Karlsruhe –
University of Applied Sciences (HSKA)
Institut für Angewandte Forschung (IAF)
Moltkestrasse 30
76133 Karlsruhe
Reiner.Jaeger@web.de
Manuel.Oswald@hs-karlsruhe.de
Peter.Spohn@hs-karlsruhe.de

Literatur

- [1] Jäger, R.; Kälber, S.: GOCA Web-Site. <http://www.goca.info>, 2010.
- [2] Jäger, R.; Weber, A.; Haas, R.: Ein ISO 9000 Handbuch für Überwachungsmessungen. In: DVW-Schriftenreihe (1997), Heft Nr. 27.
- [3] Jäger, R.; Müller, T.; Saler, H.; Schwäble, R.: Klassische und robuste Ausgleichungsverfahren. 2005.
- [4] Jäger R.; Kälber, S.; Oswald, M.: GNSS/GPS/LPS based Online Control and Alarm System (GOCA) – Mathematical Models and Technical Realization of a System for Natural and Geotechnical Deformation Monitoring and Analysis. In: Proceedings GeoSiberia, Novosibirsk, 2006, Nr. 1, S. 32-43.
- [5] Jäger, R.; Hoscislawski, A.; Oswald, M.: GNSS/LPS/LS based Online Control and Alarm System (GOCA) – Mathematical Models and Technical Realization of a Scaleable System for Natural and Geotechnical Deformation Monitoring and Analysis. Verlag der TU Graz (2009), S. 387-394.
- [6] Pelzer, H.: Zur Analyse geodätischer Deformationsmessungen. In: Reihe C der Deutschen Geodätischen Kommission (1971), Nr. 164.

Anzeigenschluss

für Heft 11 / 2010 ist der 06. 10. 2010

für Heft 12 / 2010 ist der 08. 11. 2010