

GNSS/LPS/LS based Online Control and Alarm System (GOCA) – Integrierte 3D-Ausgleichung als Schlüssel zum multisensorischen Geomonitoring im Geometrie- und Schwereraum

Reiner JÄGER reiner.jaeger@hs-karlsruhe.de
 Hochschule Karlsruhe (HSKA) - Institut für Angewandte Forschung (IAF), Karlsruhe

Zusammenfassung

Mit dem Begriff des Geomonitoring verbinden sich vielfältige Aufgaben in Geoforschung, Frühwarnung bei Naturkatastrophen sowie der Überwachung von Baustellen und baulichen Anlagen. Der Beitrag widmet sich den mathematischen Modellen der integrierten sowie der quasi-integrierten 3D-Ausgleichung zur Parametrisierung von Sensordaten im Geometrie- und Schwereraum. Integrierte und quasi-integrierte 3D-Ausgleichung erweisen sich dabei, anstelle von 1D/2D Gauß-Markov-Modellen, als künftige Schlüsselmodelle zur parametrischen Integration aller Sensordatentypen im Geometrie -und Schwereraum (Gravimetrie, GNSS, Totalstationen, Nivellement, Laserscanner, algorithmisch angepasste Navigations-sensoren, optische Daten von Videotachymetern, u.a.). Sie sind daher Gegenstand der aktuellen Implementierungen in die GOCA-Software V. 6.0 (www.goca.info).

1 Integrierte und Quasi-integrierte 3D-Netzausgleichung

1.1 Gauß-Markov-Modell (GMM) der integrierten 3D-Netzausgleichung

Von der technischen Entwicklung her waren bis in die 1990-Jahre Totalstationen (TPS) und Nivelliere aufgrund ihrer hohen Genauigkeit die vorrangige Sensorik für Deformationsnetze. Traditionell erfolgten die Netzausgleichungs-basierte Zustandsschätzung $\mathbf{x}(t)$ und die auf Koordinatenänderungen $\Delta\hat{\mathbf{x}}_O(\Delta t)$ im Objektbereich basierte Deformationsanalyse dabei unter Abbildung der betreffenden Sensorbeobachtungen (Schrägstrecken, Richtungen, Zenitdistanzen, Nivellement) in eine vertikale (1D) und eine horizontale (2D) geodätische Netzkomponente (JÄGER 2014a, KABASHI ET AL. 2017). Mit der - z.B. bereits bei der Horizontierung des TPS (Abb. 1) auf den Lotrichtungsbezug - vom „3D Geometrie- \mathbf{x} und Schwereraum \mathbf{p} “ in der allgemeinen Form

$$\mathbf{l} = \mathbf{l}(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \mathbf{W}(\mathbf{x}, \mathbf{p}, \mathbf{c})) \quad (1)$$

darzustellenden Messungen \mathbf{l} verbinden sich bei deren Reduktion in eine 1D Höhen- und eine 2D Lage-Netzkomponente schwerefeld-bezogene Reduktionen (Lotabweichungen, Geoid), Vereinfachungen (lokale Kugelgeometrie) sowie die geometrische Modellierung physikalischer Größen. Das integrierte 3D-Modell (1) wurde bereits in den 1980-Jahre als neuer Standard der geodätischen Netzausgleichung sowie der Deformationsanalyse propagiert (HEIN 1983). Mit dessen räumlicher Skalierbarkeit verdrängte das in den 1990-Jahren hinzutretende präzise GNSS jedoch das integrierte 3D-Modell (1) wieder zugunsten der

Fortführung der (2D/1D)-Modellbildung bei der Kombination von GNSS mit terrestrischen TPS-Messungen und Nivellement. Dabei kommt die geometrische Parametrisierung der schwerefeldbezogenen Höhenbezugsfläche (Geoid) hinzu.

Das integrierte 3D Gauß-Markov Modell (GMM) mit dem funktionalen Modell (1) und dem stochastischen Modell \mathbf{C}_1 der Beobachtungen \mathbf{I} wird in der geodätischen Netzausgleichung als sogenanntes fixes Randwertproblem formuliert. D.h. innerhalb des Anteils des Schwerepotentials $W(\mathbf{x}, \mathbf{p}, \mathbf{c})$ in (1) tritt die geozentrische 3D-Position $\mathbf{x}^T=(x,y,z)$ nicht als freie Unbekannte auf. Mit \mathbf{c} werden in dem aus Gravitationspotential V und Zentrifugalpotential Z zusammengesetzten Schwerepotential W (2a,b) die fixen Parameter der Erdmasse M , die Gravitationskonstante G , die große Halbachse a des Referenzellipsoids, die Winkelgeschwindigkeit ω_E der Erdrotation sowie die Position (θ_0, λ_0) des Pols des Gravitationspotentials V bezeichnet. Die Parameter \mathbf{z} sind Zusatzparameter (z.B. Orientierungen). Es gelten:

$$W(\mathbf{x}, \mathbf{p}, \mathbf{c}) = V + Z \quad \text{und} \quad (2a)$$

$$W(\mathbf{x}, \mathbf{p}, \mathbf{c}) = V(\mathbf{p} | r(x, y, z), \lambda'(x, y, z, \lambda_0, \theta_0), \theta'(x, y, z, \lambda_0, \theta_0)) + \frac{1}{2} \omega_E^2 \cdot (x^2 + y^2) \quad . \quad (2b)$$

Von großem Vorteil bzgl. (2a, b) ist die Kugelkappenrepräsentation (Adjusted Spherical Cap Harmonic (ASCH)) des Gravitationspotentials V als

$$V(r, \lambda', \theta') = \frac{G \cdot M}{r} \cdot \left(\sum_{k=0}^{k_{\max}} \left(\frac{a}{r} \right)^{n(k)} \sum_{m=0}^k (C'_{n(k),m} \cdot \cos m \lambda' + S'_{n(k),m} \cdot \sin m \lambda') \cdot P_{n(k),m}(\cos \theta') \right) \quad (2c)$$

Mit dem bei (2c) zentral in das betreffende Gebiet gelegten Pol (θ_0, λ_0) und der zugehörigen verallgemeinerten Legendrefunktion $P_{n(k),m}$ (YOUNIS 2014) lässt sich mit einer auf den Zenriwinkel α_0 beschränkten Kugelkappe mit weitaus weniger SCHA-Parametern

$$\mathbf{p} = (\mathbf{C}'_{n(k),m}, \mathbf{S}'_{n(k),m}) \quad (2d)$$

als im Fall des globalen harmonischen Standardmodells (SH) eine hohe regionale Auflösung des Schwerepotentials V (2c) erzielen. So kann mit (2c,d) das ASCH-Schwerefeld bspw. im Gebiet von Baden-Württemberg (250 km x 300 km) mit Grad und Ordnung $k=m=220$ anstelle von $n=m=7200$ in globaler Kugelfunktionsentwicklung (SH) dargestellt werden. Darüber hinaus können nach YOUNIS ET AL. 2011 globale Kugelfunktionskoeffizienten $(\mathbf{C}_{n,m}, \mathbf{S}_{n,m})$ in regionale ASCH-Koeffizienten (2d) abgebildet und im GMM der auf V (2c) basierten integrierten 3D-Ausgleichung als direkte Beobachtungen eingeführt werden. Mit dem ASCH-Modell wurde mit 130 Passpunkten (B,L,h|H), 13.000 Schwerewerten sowie mit den aus dem globalen SH-Modell EGM2008 ($n=m=2159$) ermittelten ASCH-Parametern (2d) als direkte Beobachtungen das (1-3) cm genaue Quasigeoid von Baden-Württemberg berechnet (YOUNIS 2014). Das funktionale GMM der mittels EGM2008 ausreichend genau nur Lotabweichungs-reduzierten Oberflächenschwerte $\bar{g}_{\text{grav}}^{\text{LGV}}$

als Beobachtungen \mathbf{I} lautet:

$$\bar{g}_{\text{grav}}^{\text{LGV}} = \frac{G \cdot M}{r^2} \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{a}{r} \right)^{n(k)+1} (n(k)+1) \sum_{m=0}^k (C'_{n(k),m} \cdot \cos m \lambda' + S'_{n(k),m} \cdot \sin m \lambda') \cdot P_{n(k),m}(\cos \theta') \quad .(3)$$

Das funktionale Modell für astronomische Lotabweichungsbeobachtungen \mathbf{I} - modern mit Zenitkamera/GNSS Systemen zu ermitteln - findet sich ebenfalls in YOUNIS 2014.

Das strenge integrierte 3D-Modell mit der Parametrisierung des Schwerpotentials W nach (2a-d) ist allen o.g. Beobachtungstypen zugänglich. Im Geomonitoring ist das integrierte GMM jedoch nur bei Einbeziehung beobachteter Schwerewerte \mathbf{l} (3) - z. B. im Fall großer Massenänderungen (Bergbau, Ölfelder) oder geodynamischer Netze - obligatorisch. Ansonsten kann das nachfolgend behandelte einfachere quasi-integrierte Modell verwendet werden.

1.2 Gauß-Markov-Modell (GMM) der quasi-integrierten 3D-Netzausgleichung

Im quasi-integrierten Fall erfolgt die Parametrisierung der Beobachtungen \mathbf{l} des GMM als

$$\mathbf{l} = \mathbf{l}(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \bar{\mathbf{p}}(W(\mathbf{x}, \mathbf{p}, \mathbf{c}))), \mathbf{C}_1, \text{ mit } \bar{\mathbf{p}}(W(\mathbf{x}, \mathbf{p}, \mathbf{c})) =: (\varphi(\mathbf{x}, \mathbf{p}, \mathbf{c}), \lambda(\mathbf{x}, \mathbf{p}, \mathbf{c}), N(\mathbf{x}, \mathbf{p}, \mathbf{c})) . \quad (4a,b)$$

Die auf das Schwerefeld W (2a-d) bezogenen "geometrischen" Ersatzparameter $\bar{\mathbf{p}}(W(\mathbf{x}, \mathbf{p}, \mathbf{c}))$ (4b) sind dessen „horizontale“ (astronomischen Lotrichtungen φ (Breite) und λ (Länge)) bzw. „vertikale“ Komponente (Quasigeoidhöhe N). Es gilt:

$$\varphi(W(\mathbf{x}, \mathbf{p}, \mathbf{c})) = \arctan\left(\frac{W_z}{\sqrt{W_x^2 + W_y^2}}\right) \quad \text{und} \quad \lambda(W(\mathbf{x}, \mathbf{p}, \mathbf{c})) = \arctan\left(\frac{W_y}{W_x}\right) \quad (5a,b)$$

$$N(W(\mathbf{x}, \mathbf{p}, \mathbf{c})) = (W - U)_P / \gamma_{h(x,y,z)-N} . \quad (5c)$$

Mit $U = U(\mathbf{x}, \mathbf{c})$ wird in (5c) das Referenzschwerefeld (GRS80) und mit γ_{h-N} die zugehörige Referenzschwere im Telluroidpunkt (Höhe $h-N$) bezeichnet. Die auf das Schwerefeld (2a-d) bezogenen geometrischen Parameter $\bar{\mathbf{p}} = (\varphi, \lambda, N)$ des quasi-integrierten 3D-Modells werden punktweise als Unbekannte und - über (5a,b,c) - zugleich wiederum als direkte Beobachtungen des GMM der quasi-integrierten 3D-Ausgleichung eingeführt.

2 Quasi-integriertes 3D-Modell im Monitoringsystem GOCA

Abb. 1 stellt das quasi-integrierte 3D-Modell am Beispiel von Totalstationsbeobachtungen (TPS) dar. Bei windschiefen Lotrichtungen (φ_i, λ_i) bzw. (φ_j, λ_j) im Standpunktsystem (Instrumentenhöhe i) bzw. im Zielpunktsystem (Reflektorhöhe t) gilt folgende Vektorbilanz:

$$\mathbf{x}_i + \mathbf{i} + \mathbf{l}_{ij} - \mathbf{t} - \mathbf{x}_j = \bar{\mathbf{0}} \quad (6a)$$

Ausgehend von der Darstellung der Nullvektorbilanz (6a) gilt für die - für den für TPS-Beobachtungen (Richtungen, Zenitdistanzen und Schrägstrecken) - maßgeblichen Beobachtungsvektor \mathbf{l}_{ij}^i nach Umstellung von (6a) bzgl. des gewählten Standpunktsystems (i):

$$\mathbf{l}_{ij}^i = \begin{bmatrix} \Delta u \\ \Delta w \\ \Delta w \end{bmatrix}_{ij}^i = \mathbf{R}_e^i(\varphi_i, \lambda_i) \cdot \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix}_{ij} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ i \end{bmatrix}^i + \mathbf{R}_e^i(\varphi_i, \lambda_i) \cdot \mathbf{R}_j^e(\varphi_j, \lambda_j) \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ t \end{bmatrix}^j . \quad (6b)$$

Im Standpunktsystem von P_i (Abb. 1, links) sind die unreduzierten TPS-Beobachtungen \mathbf{l} der Schrägstreckenmessungen s_{ij} , der Richtungsbeobachtungen r_{ij} und der Zenitdistanzbeobachtungen r_{ij} zu den Zielpunkten P_j über die betreffenden auf das lokale astronomische Standpunktsystem (LAV) bezogen Koordinatendifferenzen Δu_{ij} , Δv_{ij} und Δw_{ij} in \mathbf{l}_{ij}^i (6b), links zu parametrisieren (HECK, B., ILLNER, M. UND R. JÄGER (1995):

$$s_{ij} = \sqrt{\Delta u_{ij}^2 + \Delta v_{ij}^2 + \Delta w_{ij}^2}, r_{ij} = \text{artan}\left(\frac{\Delta v_{ij}}{\Delta u_{ij}}\right) - o_i, z_{ij} = \text{artan}\left(\frac{\sqrt{\Delta u_{ij}^2 + \Delta v_{ij}^2}}{\Delta w_{ij}}\right) - \frac{s_{ij}}{2R} k_i. \quad (7a,b,c)$$

Mit o_i und k_i werden in (7a,b,c) die Orientierungsunbekannte bzw. die als Unbekannte oder mit festem Wert (Standard $k=0.13$) im Standpunktpunkt P_i auftretende Refraktionsunbekannte bezeichnet, mit R der mittlere Erdradius.

Durch zeilenweises Einsetzen von (6b), rechts in (7a,b,c) werden die betreffenden funktionalen GMM der TPS-Beobachtungen schließlich durch die globalen punktwisen Unbekannten $P_i(x_i, y_i, z_i, \varphi_i, \lambda_i)$ im 3D-Geometrie- und Schwererraum des Netzes parametrisiert.

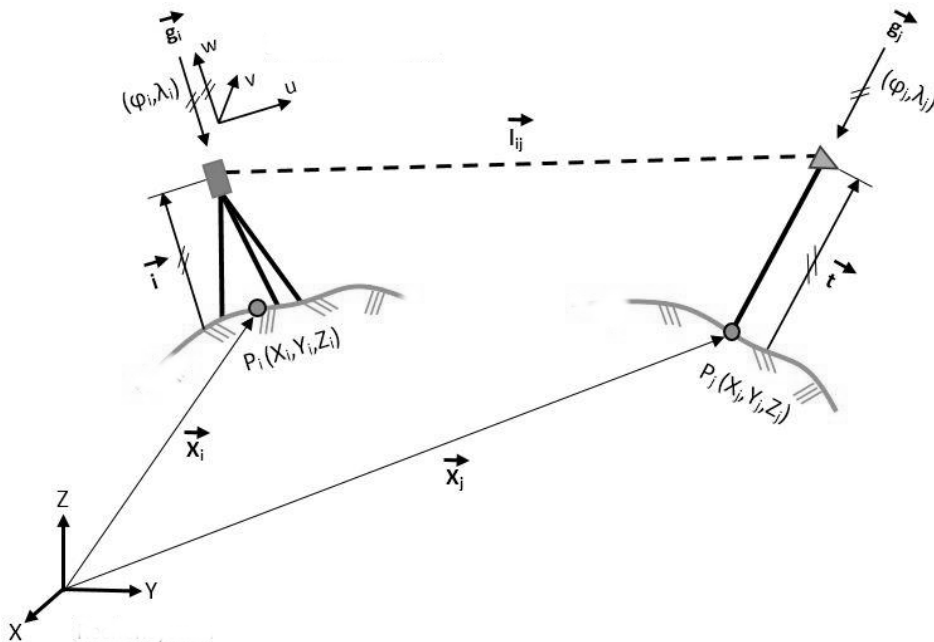


Abb. 1: Vektorbilanz zur quasi-integrierten 3D-Modellbildung für Totalstationsbeobachtungen (TPS) bei windschiefen Lotrichtungen in Standpunkt- und Zielpunktsystem

Direkt im einheitlichen erdfesten geozentrisch-kartesischen Rechensystem (x,y,z) ist das funktionale GMM von 3D GNSS-Baselinebeobachtungen \mathbf{l} wie folgt anzugeben:

$$\mathbf{b}^T = (\Delta x_{ij}, \Delta y_{ij}, \Delta z_{ij}) \quad (8)$$

Die Abb. 2 zeigt das GNSS und TPS kombinierte 3D-Geomonitoringnetz bzw. GOCA-Projekt Stützmauer A98 bei Rötteln.

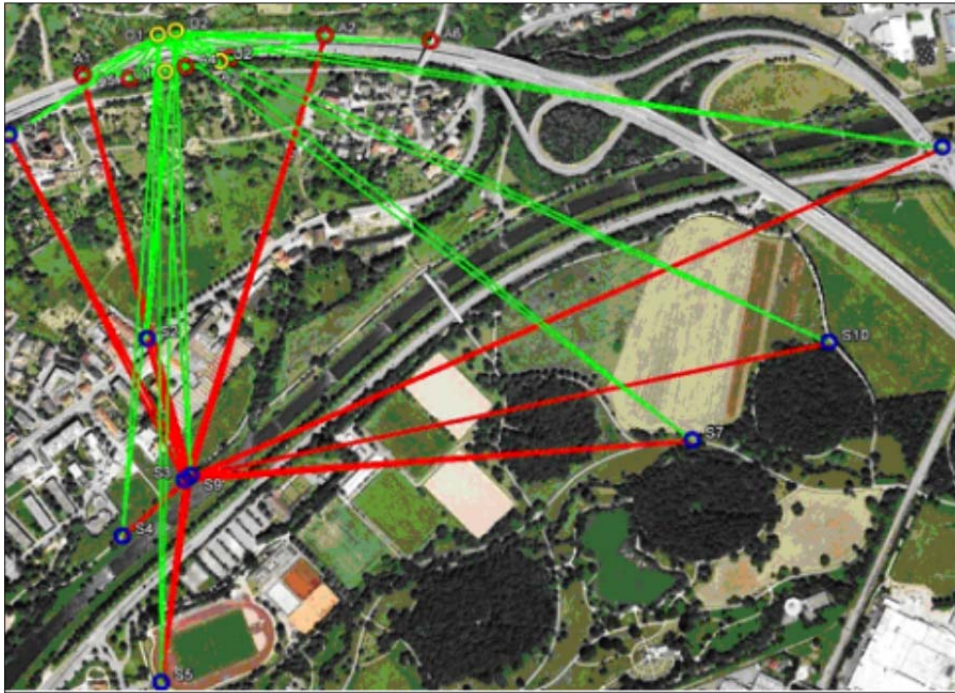


Abb. 2: GOCA-Projekt Stützmauer A98 Rötteln. Rot: GNSS-Baselines, Grün: TPS-Sichten
Nivellementbeobachtungen \mathbf{l} lassen sich mit N (5c) im quasi-integrierten Model nach

$$\Delta H_{ij} = (h(x, y, z)_j - N_j) - (h(x, y, z)_i - N_i) \quad (9a)$$

parametrisieren. Im Gegensatz zu Potentialdifferenzen aus Nivellement und Schwere ist das Nivellement für sich allein in physikalischer Hinsicht im integrierten GMM nicht darstellbar (anholonom). Großräumig verlaufende Nivellementsbeobachtungen ΔH_{ij} sind auch im quasi-integrierten GMM prinzipiell mit HBF-adäquaten Reduktionen (z.B. Normalhöhenreduktion) zu versehen. Als alternativer Ansatz zu (9a) kommt die Parametrisierung der lokalen Neigung (e_x, e_y) zwischen der Höhenbezugsfläche (HBF) und dem Ellipsoid in Betracht. Hierfür gilt:

$$\Delta H_{ij} = (h_j - h_i) + [-N(B)/2 \cdot e^2 \cdot \sin(2B) \cdot \sin(L) \cdot e_x + N(B)/2 \cdot e^2 \cdot \sin(2B) \cdot \cos(L) \cdot e_y] \quad (9b)$$

Eine weitere Alternative zu (9a) ist das in JÄGER 2014b und KABASHI ET AL. 2017 dargestellte HBF-Modell $N(\mathbf{p})$ einer Polynomfläche. Im konsequent quasi-integrierten GMM, wo die Komponente N als „beobachtete Unbekannte“ mit externer stochastischer Vorinformation auftritt, entfällt die im Fall von (9b) und anderen Ansätzen zur Kombination von Nivellement und TPS mit GNSS bestehende Forderung nach mehr als einem Verknüpfungspunkt zwischen GNSS und den terrestrischen Beobachtungstypen.

3 Schlussfolgerungen und Ausblick

Kapitel 2 zeigt die vorteilhaft ohne Reduktionen sowie Zusatzforderungen an das Netzdesign auskommende quasi-integrierte 3D-Netzausgleichung. Im Fall von Schweremessungen - aber auch generell - kann diese durch Freigabe der Parameter \mathbf{p} in (4a,b,c) wiederum in das integrierte GMM überführt werden (HECK ET. AL, 1995). Für die Beobachtungskomponenten

- Pixel von Videotachymetern
- Laserscanner-Punktwolken
- Terrestrisches SAR sowie Satelliten-basiertes INSAR
- GNSS/MEMS-Sensorik zum Structural Health Monitoring (SHM) (JÄGER 2014b)

bzw. deren gegenwärtig schrittweise erfolgenden Integration in die Netzausgleichungsstufen des Geomonitoringsystems GOCA (www.goca.info) kommen allgemein nur das integrierte bzw. das quasi-integrierte 3D-Modell in Frage. Das 1D/2D-GMM wird optional für die betreffenden Standardsensoren zum Monitoring reiner Lage-/Höhennetze (z.B. Senkungsgebiete) bestehen bleiben.

Literatur

- HECK, B., ILLNER, M. UND R. JÄGER (1995): Deformationsanalyse zum Testnetz Karlsruhe auf der Basis der terrestrischen Messungen und aktueller GPS-Messungen. Festschrift Draheim-Kuntz-Mälzer. Universität Karlsruhe.
- HEIN, G. (1983): Aspekte der integrierten Geodäsie für Netzausgleichungen und Deformationsanalysen. In: Welch, W. (Hrsg.). Deformationsanalysen '83. Geometrische Analyse und Interpretation von Deformationen Geodätischer Netze. Beiträge zum Geodätischen Seminar 22. April 1983. Schriftenreihe des Wissenschaftlichen Studiengangs Vermessungswesen der Hochschule der Bundeswehr München, Heft 9, S. 183-195.
- JÄGER, R. (2014a): GNSS/LPS based Online Control and Alarm System (GOCA) - Konzept, Modellbildung und Realisierung eines Systems zum Geomonitoring in Bauwesen, Geotechnik und Naturkatastrophenschutz. Proceedings 9. Kolloquium Bauen in Boden und Fels. Technische Akademie Esslingen (TAE). Januar 2014. ISBN 978-3-943563-08-05, Registered at <http://dnb.dnb.de>. S. 359-368.
- JÄGER, R. (2014b): GNSS/GPS based Online Control and Alarm System (GOCA) - Weiterentwicklungen zum Integrierten Geomonitoring mit LowCost GNSS und inertialen MEMS-Sensoren. Proceedings IX. Mittweidaer Talsperrentag 2014. Mittweida, 14.-15. Mai '14. Wissenschaftliche Zeitschrift HS Mittweida. ISSN 14377624. S. 21-33.
- YOUNIS, G., JÄGER, R. UND M. BECKER (2014): Transformation of global spherical harmonic models of the gravity field to a local adjusted spherical cap harmonic model. Arabian Journal of Geosciences. May 2011. ISSN 1866-7511. Springer Verlag. Seiten 4-9.
- YOUNS, G. (2014): Regional gravity field modeling with adjusted spherical cap harmonics in an integrated approach. Schriftenreihe / Fachrichtung Geodäsie, Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie (Dissertationen). TU Darmstadt. Heft 39.
- KABASHI, I., JÄGER, R. UND M. RAGOSSNIG-ANGST (2017): Online-Geomonitoring Autobahnknoten Prater/Wien auf dem Verbindungsgleis U2/13 und den Tübbingtunnel U2/5. Dieser Band.