

---

# Online-Geomonitoring Autobahnknoten Prater/Wien - auf dem Verbindungsgleis U2/13 und den Tübbingtunnel U2/5

Ismail KABASHI<sup>1</sup>, Reiner JÄGER<sup>2</sup> und Michaela RAGOSSNIG-ANGST<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Vermessung Angst ZT GmbH, 1020 Wien, kabashi@angst.at, ragossnig@angst.at

<sup>2</sup> Hochschule Karlsruhe (HSKA) - Institut für Angewandte Forschung (IAF), Karlsruhe,  
reiner.jaeger@hs-karlsruhe.de

## Einleitung

In der modernen Bau- und Planungsindustrie sowie insbesondere auch bei Sanierungsmaßnahmen alter Objekte oder Aus- und Umbaumaßnahmen kommt dem Sicherheitsaspekt eine große Bedeutung zu. Ein potentielle Schadens- und Gefährdungsquelle bei Renovierungen bzw. Umbauten sind kritische Deformationen in den mittel- und unmittelbar betroffenen Objektbereichen.

Wie in diesem Beitrag dargestellt, werden in modernen Monitoringkonzepten die zur Erfassung des Deformationsprozesses eingesetzten Einzelsensoren online – entweder im Konzept einer geodätischen Netzausgleichung oder einer darauf zeitgleich basierenden Systemanalyse (integriertes Geomonitoring, Structural Health Monitoring (SHM)) - zu einem Geosensornetzwerk zusammengeschlossen. Die Sensordaten werden dabei über intelligente Informations- und Kommunikationstechnologien an einem dezentralen Prozessierungsknoten oder Server weitermodelliert. So können - sensorisch wie auch räumlich skalierbar - geometrische und physikalische Veränderungen (SHM) (JÄGER 2014) im Verlauf natürlicher Prozesse oder auch bei Bauarbeiten, Renovierungen etc. permanent oder in definierten Zeitintervallen qualitativ detektiert bzw. quantitativ nachgewiesen werden.

Mit einer geeignet geplanten Messanordnung (Stichwort „Sensitivitätsanalyse“ (JÄGER (1999-2016)) können heute schon geringe geometrische Veränderungen an Bauwerks- oder Anlagenteilen automatisiert und dabei permanent erfasst werden. Das bei Vermessung ANGST ZT GmbH verwendete Online-Monitoring System bietet in Verbindung mit den GOCA-Softwarekomponenten entlang der Geomonitoringkette einen jederzeit über Internet abrufbaren Überblick über den Veränderungszustand des beobachteten Objektes. Zudem wird bei Überschreitung vorgegebener Toleranzwerte über ein integriertes Alarmsystem automatisch Alarm ausgelöst.

Nachfolgend wird über das online und Geo-Monitoring und Alarmierungssystem beim abgeschlossenen Projekt des Verkehrsknotens A4/A23 (“Knoten Prater“) berichtet. Darüber hinaus werden die laufenden Fortentwicklungen im Bereich der mathematischen Modellbildung und der entsprechenden GOCA-Softwarekomponenten behandelt.

## Zum Projekt

Im Zuge der Umbauarbeiten des Verkehrsknotens A4/A23 (“Knoten Prater“) durch die AS-FiNAG (TECTON CONSULT, 2012) kam es auch zu Baumaßnahmen in Bereichen, die

---

Hanke, K. & Weinold, Th. (Hrsg.) (2017): 19. Internationale Geodätische Woche Obergurgl 2017.

© Herbert Wichmann Verlag, VDE VERLAG GMBH, Berlin/Offenbach. ISBN 978-3-87907-xxx-x.

Einfluss auf den Verantwortungsbereich der Wiener Linien (U-Bahn) haben. Zwei neue Brücken zur Überquerung des Donaukanals wurden errichtet. Für die Errichtung der Brücke B 0205-1 kam eine über den Donaukanal verlaufende Unterstellung zur Anwendung. Aus der Belastung durch die Unterstellung sowie aus der Belastung durch die temporären Hinterfüllungen waren Setzungen im Bereich des U-Bahn-Tübbingtunnels U2/5 zu erwarten. Darüber hinaus wurden auf die temporären Hinterfüllungen Oberflächenlasten in Form von Betonlasten aufgebracht (BGG CONSULT, 2012). Zur Überwachung und auch zur Beurteilung der Auswirkungen dieser Maßnahmen auf den betroffenen Verbindungsgleis U2/13 und Tübbingtunnel U2/5, der auch unter dem Donaukanal durchläuft wurde eine vermessungsmesstechnische Überwachung in Form eines online-Geomonitoring vorgesehen.

## 1. Einrichten und Betrieb des Online-Monitoring-Messsystems

Die Aufteilung der Messpunkte in den Messquerschnitten wurden durch die zuständigen Statiker der Wiener Linien festgelegt und im Bericht zur Ermittlung der Warn- und Alarmwerte dargestellt (siehe Kap. 1.1) (IC CONSULENTEN, 2012, TECTON CONSULT, 2012). In jedem Messquerschnitt wurden vor Beginn der Arbeiten im Verbindungsgleis U2/13 und Tübbingtunnel U2/5 wie vorgesehen TPS-Prismen gesetzt, um ein automatisches Beobachten mit Totalstationen (TPS) zu ermöglichen. Die Messroboter (TC, TPS) wurden auf Konsolen montiert, die fest mit Schrauben an der jeweiligen Mauer befestigt wurden (s. Abb. 1). Unmittelbar nach dem Einrichten des Online-Monitoring-System wurde mit dem GOCA-basierten System automatisiert die sog. Nullmessung zur Festlegung des stabilen 3D Referenzrahmens  $\mathbf{x}_R$  und des Ausgangszustands im Objektbereich  $\mathbf{x}_O$  (siehe Kap. 3) durchgeführt.

**Messintervalle:** Für die Nullmessung wurden die Messroboter 24 Stunden online in Betrieb gesetzt, die Beobachtungen mit GOCA (Abb. 3) ausgewertet, visualisiert und interpretiert. Für die weiteren Epochen wurde die Durchführung des Beobachtungsprogramms für einmal pro Stunde festgelegt.

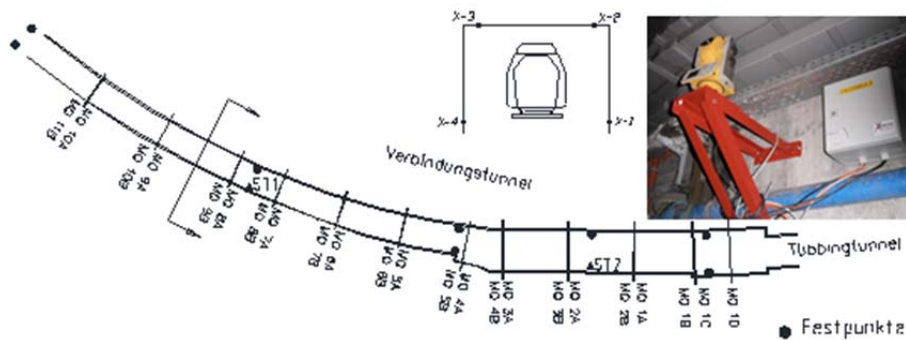
**Warnwerte und Warnstufen:** Bei Abweichungen vom erwarteten Verhalten wurde je nach Größe der Abweichung eine Warnstufe ausgewiesen.

**Warnwert:** bei Erreichen der Warnwerte - noch keine Standsicherheitsgefährdung  
**Alarmwert:** bei Überschreiten der Alarmwerte - Standsicherheitsgefährdungen

### 1.1 Messquerschnitte und -punkte sowie Warn- und Alarmwerte Verbindungstunnel

Der zu betrachtende Verbindungstunnelbereich beinhaltete 11 Baublöcke. Prinzipiell waren in jedem Baublock am Blockanfang und Blockende bei den jeweiligen Blockfugen Messquerschnitte vorzusehen. Daraus resultierten zwei Messquerschnitte pro Block, wobei ein Messquerschnitt aus vier Messpunkten bestand, zwei Punkte oben und zwei Punkte unten, deren räumliche Lage zu erfassen war (BGG CONSULT, 2012) Die Warnwerte betragen für die Differenzialverformung/Vertikal zwischen  $\pm 2$  mm bis zu  $\pm 5$  mm, und für die Differenzialverformung/Horizontal  $\pm 2$  mm bis zu  $\pm 4$  mm, abhängig davon, auf welchen Messquerschnitten sie sich befanden. Die Alarmwerte betragen für die Konvergenz

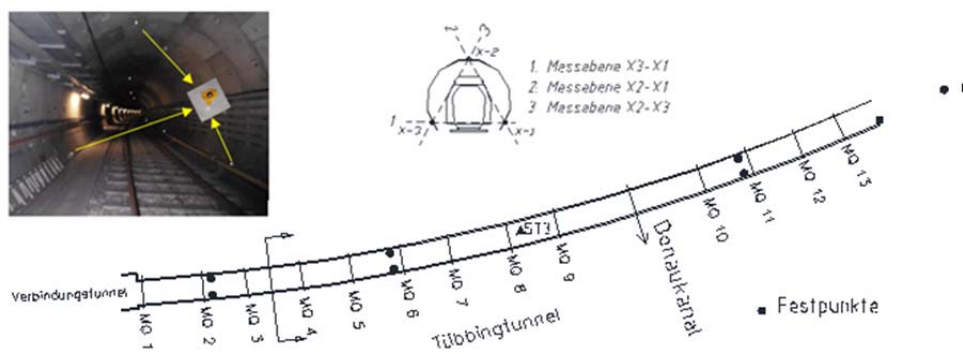
zwischen  $\pm 2$  mm bis zu  $\pm 4$  mm, auch abhängig davon, auf welchen Messquerschnitten sie sich befanden (IC CONSULENTEN, 2012, TECTON CONSULT, 2012).



**Abb. 1:** Verbindungstunnel und Tunnelprofil, Längsschnitt, Messquerschnitt und Festpunktanlage

### Messquerschnitte und -punkte sowie Warn- und Alarmwerte Tübbingtunnel

Die Verschiebungen des Tübbingtunnels setzen sich aus einem Absolutanteil in Bezug auf den Untergrund sowie einem Relativanteil zusammen. In der Praxis wäre bei Grenzwertüberschreitung auf der Baustelle automatisch eine Warnung über ein akustisches und auch ein optisches Signal erfolgt. Gleichzeitig wären die Verantwortlichen (Mitarbeiter der Vermessung Angst ZT GmbH und in weiterer Folge das Baumanagement) mittels SMS und E-Mail über den Warnzustand informiert worden. Die Warnwerte betragen für die Konvergenz zwischen 3 mm bis zu 6 mm und für die Divergenz 2 mm, abhängig davon, auf welcher Messebene sie sich befanden. Die Alarmwerte betragen für die Konvergenz zwischen 5 mm bis zu 7 mm und für die Divergenz 4 mm, auch abhängig davon, auf welcher Messebene sie sich befanden (IC CONSULENTEN, 2012, TECTON CONSULT, 2012).



**Abb. 2:** Tübbingtunnel und Tunnelprofil, Längsschnitt, Messquerschnitt und Festpunktanlage

Die automatische Absetzung einer Alarmmeldung – der vordefinierte kritische Objektzustand wurde im Verlauf des Projektes nicht erreicht – hätte für das Personal im Gefahrenbe-

reich das sofortige Verlassen des Gefahrenbereiches und für die Fahrdienstleistung (Bahn) eine unverzügliche Streckensperre zur Folge gehabt.

### Messpunktstabilisierung und Netzanlage

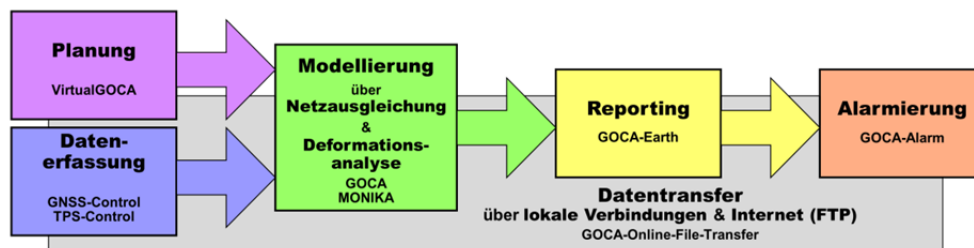
Um die Messungen an Messobjekt bzw. Verbindungsgleis U2/13 und Tübingtunnel U2/5 durchführen zu können, mussten die Messobjekte mit einer bestimmten Messpunkteanzahl ausgestattet werden. Alle Messpunkte (Netz- bzw. Referenzpunkte  $\mathbf{x}_R$  und Objektpunkte  $\mathbf{x}_O$ ) wurden mittels Reflektoren, die am Bauwerk mittels Dübeln fest verbunden waren, exakt definiert und gewährten die Beobachtungsmöglichkeit für den Messzeitraum.

Um Änderungen der Bauwerksgeometrie infolge der Bauarbeiten erfassen zu können, wurden die Messdaten der Referenz- und Objektpunkte mit Hilfe der Verfahren der geodätischen Netzmessung und Netzausgleichung mit GOCA ausgewertet und epochenweise eine Analyse des Stabilitätsverhaltens mittels statistisch fundierter Deformationsanalyse durchgeführt (Kap. 3). Das geodätische Referenznetz  $\mathbf{x}_R$  bestand aus verschränkten Polygonzügen mit 10 Referenzpunkten und 7 Referenzpunkten, wobei sich jeweils zwei Punkte außerhalb des Deformationsbereichs  $\mathbf{x}_O$  befanden. Vier Referenzpunkte in der Mitte des Tunnels (U 2/13) dienten als doppelte Referenzpunkte für die Messstation 1 und Messstation 2.

## 2. Das geodätische Online Geomonitoringsystem GOCA

Für das Online-Geomonitoring des Projektes Knoten Prater war der Einsatz von einem Monitoringmesssystem (MMS) mit drei (zwei im Verbindungstunnel und eine im Tübingtunnel) Totalstationen notwendig, die mit Geosensornetzwerken mit dem MMS verbunden sind. Verwendet wurde für den Betrieb des MMS die Software GOCA (JÄGER (1999-2016), Abb. 3), die unter der Projektleitung von Prof. Dr. Reiner Jäger am Institut für Angewandte Forschung der Hochschule Karlsruhe entwickelt wurde. Das MMS sollte die Anforderungen eines geodätischen 3D-online-Überwachungssystem erfüllen (s. KABASHI et al. 2011, S.61).

Interdisziplinär erfolgte die Aufgliederung der jeweiligen Monitoringaufgabe (Geomonitoringkette, Abb. 3) in die Komponenten Datenerfassung, Modellierung, Reporting und Reaktion (Umsetzung eines Alarmierungsplans) (JÄGER (1999-2016)). Zentrale Zustandsgröße der o.g. Modellierungskomponente im geodätischen Geo-Monitoring ist die dreidimensionale Verschiebung von Objektpunkten als Lage- und Höhenänderungen in einem einheitlichen Koordinatensystem.



**Abb. 3:** Komponenten der geodätischen Geomonitoringkette am Beispiel GOCA-System (JÄGER 2014, JÄGER 1999-2016)

Mit Hilfe der genannten Basiskomponenten erfolgte sowohl die Datensammlung als auch die Auswertung der Daten mittels GOCA. Die auf (PELZER 1971, PELZER 1976) zurückgehende netzausgleichungsbasierte Zustandsmodellierung und statistisch fundierte Deformationsanalyse erfolgt hierbei im Modellierungsteil (Abb. 3, 2-ter Block der Geomonitoringkette).

## 2.1 Verwendete Hardware und Software

Ein Online-Monitoringsystem zur automatischen Überwachung von Bauwerksbewegungen bestand im Rahmen des Projekts aus folgenden Basiskomponenten:

- Messsensor (motorisierter Präzisionstachymeter mit automatischer Zielerkennung auf Prismen)
- Kommunikationsbox mit Rechner und GOCA-TPS-Control zur Ansteuerung des Messensors inkl. automatischer Messdatenerfassung (Geomonitoringkomponente 1, Abb. 3).
- GOCA-Deformationsanalysesoftware und GOCA-Alarm zur netzausgleichungsbasierten Deformationszustandsschätzung, Visualisierung und Alarmierung (Geomonitoringkomponenten 2, 3 und 4).

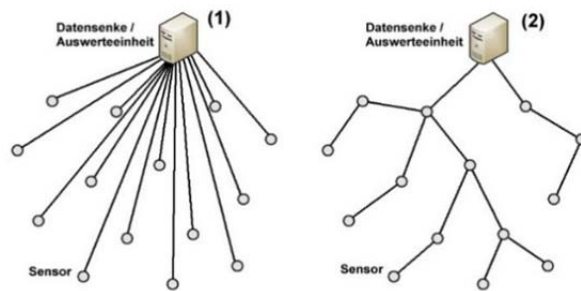
Neben dem Leistungsvermögen des Präzisionstachymeters ist vor allem das Leistungsspektrum der Softwarekomponenten der Kette (Geomonitoringkomponenten 2, 3 und 4, Abb. 3) ein zentrales Kriterium des Gesamtsystems (JÄGER 2014, JÄGER (1999-2016)).

## 2.2 Geosensornetzwerke

Unter dem übergeordneten Begriff "Sensornetzwerk" (Abb. 4) versteht man die Verknüpfung mehrerer Sensoren zu einem Netz, um gemeinsame oder spezifische Zustandsaussagen und Zustandsänderungen zusammenhängend ermitteln zu können. Der Begriff Geosensornetzwerk umfasst Sensortypen für Monitoringaufgaben in den geowissenschaftlichen Disziplinen (Meteorologie, Hydrologie, Geodäsie, Geologie, Geophysik, etc.), welche je nach Komplexität bzw. dem interdisziplinären Charakter der Zustandsschätzung verschiedenartige Sensorarten (geodätische Sensoren, geotechnische Sensoren, Meteo-Sensoren etc.) umfassen. Die Genauigkeit der Georeferenzierung der Sensoren ist problem- und sensorspezifisch von unterschiedlicher Bedeutung. In der klassischen geodätischen Deformationsanalyse - als Aufgabe der permanenten Überwachung von Verschiebungszuständen nach (PELZER 1971, PELZER 1976) in einem Netzwerk geodätischer Sensoren - ist die fortlaufende Sensorgeoreferenzierung in Form der hochgenauen Sensor-Positionierung Voraussetzung bzw. zugleich die Basiszustandsgröße für die weiteren Zustandsschätzungen (Abb. 2) (KABASHI et al. 2011).

Die Datenübertragung von den Sensoren zur Datensinke/Auswerteeinheit in Geosensornetzwerken kann mittels direkter Verbindungen (Stern-Topologie, Abb. 4 (1)) erfolgen. Nach dem Schema Abb. 4 (2) (Manuell eingerichtetes Datennetzwerk) wurden die drei im Verbindungstunnel und Tübbingtunnel eingesetzten Instrumente mittels Kabeln mit einem Steuerrechner verbunden. Außer den Instrumenten wurden auch andere Sensoren z. B. meteorologische Sensoren berücksichtigt.

So konnte man von jeweils einem Zentralrechner die drei eingesetzten Instrumente über Internet (z.B. vom Büro aus) in Betrieb nehmen, ansteuern und ständig kontrollieren.



**Abb. 4:** (1) Direkte Datenverbindungen und manuell eingerichtetes Datennetzwerk (KABASHI et al. 2013)

Das Zentralrechnersystem wirkte sich außerordentlich zeit- und kostensparend gegenüber früheren Installationen aus.

### 2.3 Instrumente und Messverlauf

Für die Lage- und Höhemessungen wurden drei Präzisionstachymeter (TOPCON IS 301) eingesetzt. Mit Hilfe der automatischen Zielerfassung (ATR) und dem TPSControl Programms wurden die drei Komponenten (Horizontalwinkel (Hz), Zenitdistanz (V) und Entfernung (D)) gleichzeitig ermittelt und im online-Modus registriert. Das Arbeiten mit den Instrumenten der TOPCON IS-Serie ist auf Grund des strukturierten Menüs außerordentlich vorteilhaft. Der vorhandene Robotik-Modus (Online-Modus) ermöglichte im Zusammenhang mit der Fernsteuerung durch das GOCA-TPS-Control-Programm eine sehr rasche Durchführung der einzelnen Messzyklen des vom Auftraggeber vorgegebenen Messprogramms. Um alle beschriebenen speziellen Anforderungen an die Überwachung gerecht zu werden und erfüllen zu können, wurde auch das automatisch arbeitende Online-MMS "GOCA" installiert.

Mit Hilfe der netzausgleichsbasierten GOCA-Software ist es möglich, absolute Verformungen in Form von Online-Verschiebungsschätzungen bezogen auf ein übergeordnetes Koordinatensystem der Festpunkte (Referenzpunktkoordinatensystem  $x_R$ , Kap. 3) im Submillimeterbereich zu errechnen. Mitarbeiter der Vermessung Angst ZT GmbH beobachteten online vom Büro aus das Verhalten des Objekts und lieferten die entsprechenden Messergebnisse an die Bauleitung, wobei täglich auch ein Messprotokoll per E-Mail übermittelt wurde. Die Ergebnisse wurden in Echtzeit auf dem Server der Vermessung Angst ZT GmbH visualisiert. Der Zugriff wurde allen entsprechenden Stellen mittels Login und Passwort zur Verfügung gestellt. Der Auftraggeber konnte jederzeit und überall die aktuellen Lageänderungen der Objekte während der Bauarbeiten abrufen.

## 3. Deformationsanalyse, Modellierung und Analyse der Messdaten

### 3.1 Grundlagen

Das Konzept des geodätischen Geomonitoring - die nachstehend zu behandelnden Zustandsschätzungsinstanzen der auf den Daten vernetzter Sensoren (Abb. 4) basierenden ein- oder mehrstufigen geodätischen Netzausgleichung - ist seit der Grundsteinlegung und

fachlichen Definition der mathematischen Modellbildung der Deformationsanalyse (PELZER 1971) vor über vierzig Jahren unverändert geblieben, siehe auch (PELZER 1976, JÄGER 2014, JÄGER 1999-2016, KABASHI et al. 2011 und 2013, KÄLBER & JÄGER 2000, JÄGER & GONZALEZ 2005, JÄGER 2017). Die technischen Innovationen im IT-Zeitalter ermöglichen seit nunmehr drei Jahrzehnten aber in unterschiedlichen Entwicklungsstufen die durchgehende Automatisierung bzw. Echtzeitfähigkeit der Geomonitoringkette (Abb. 4) und damit den örtlich personalfreien, permanenten Echtzeiteinsatz geodätischer Geomonitoringsysteme wie GOCA (JÄGER (1999-2016)) zum Katastrophenschutz und als Frühwarnsysteme im Bauwesen (JÄGER 2014). In netzausgleichungsbasierten Deformationsanalyse bilden die Sensorpunkte der als stabil anzunehmenden Referenzpunkte  $\mathbf{x}_R$  das einheitliche 3D-Koordinatensystem zur Berechnung und Modellierung der Objektpunktpositionen  $\mathbf{x}_O$  in einem oder mehreren zusammenhängend modellierbaren Objektgebieten. Die Stabilität und Kongruenz der Referenzpunkte  $\mathbf{x}_R$  kann dabei ebenfalls statistisch analysiert und nachgewiesen werden (KÄLBER & JÄGER 2000).

Im netzausgleichungsbasierten Konzept von GOCA (Abb. 3) werden die GNSS- und LPS-Sensordaten online oder near-online (bei epochalen Messungen auch post-processed) in einem 3-stufigen Ausgleichungskonzept (JÄGER 2014, KABASHI et al. 2011 und 2013), (KÄLBER & JÄGER 2000, JÄGER 2014) Kleinste-Quadrate-Schätzungen sowie robuste M-Schätzer (JÄGER, et al. 2005, JÄGER & GONZALEZ 2005) weiterverarbeitet. Die Initialisierungsstufe 1 dient der Festlegung des über die Zeit des Geomonitoring hinweg stabilen 3D-Referenzpunktraumens  $\mathbf{x}_R$  und dessen Kovarianzmatrix  $\mathbf{C}_{\mathbf{x}_R}$ . Die Stufe 2 umfasst im nachstehenden Gauß-Markov-Modell (GMM) das (2D/1D) Netzausgleichungskonzepts (1a-e) die fortlaufende Ausgleichung der in entsprechende Lage- und Höhenkomponenten abgebildeten GNSS-Berechnungen (Raumvektoren) sowie TPS-Daten (Schrägstrecken, Richtungen, Zenitdistanzen und nivellierte Höhenunterschiede). Damit erfolgt die 3D-Georeferenzierung der Objektpunkte  $\mathbf{x}_O(t)$  mit Kovarianzmatrix  $\mathbf{C}_O(t)$  im Referenzpunktdatum  $\mathbf{x}_R$  in der GOCA-Ausgleichungsstufe 2.

Zentrale Zustandsgröße der Modellierungskomponente, aber auch des Reporting und der Alarmierung der geodätischen Geomonitoringkette (Abb. 4), ist der aus den Sensordaten abzuleitende 3D-Verschiebungsvektor  $\mathbf{u}$  der Objektpunkte  $\mathbf{x}_O(t)$  (Abb. 6) sowie dessen Geschwindigkeits- und Beschleunigungskomponenten  $\dot{\mathbf{u}}$  und  $\ddot{\mathbf{u}}$ . Die Georeferenzierung der Objektpunktzeitreihen  $\mathbf{x}_O(t)$  sowie der weiteren Objektzustandsgrößen der Verschiebungen, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen  $\mathbf{y}(t) = [\mathbf{u}(t), \dot{\mathbf{u}}(t), \ddot{\mathbf{u}}(t)]^T$  (JÄGER & GONZALEZ 2005) erfolgt in der zur GOCA-Stufe 2 parallel laufenden Stufe 3 (Deformationsanalyse) ebenfalls wiederum im einheitlichen Referenzpunktkoordinatensystem  $\mathbf{x}_R$ .

### 3.2 GOCA-Netzausgleichungskonzept und Ausgleichungsstufen 1 und 2

Das funktionale Modell der Lage- und Höhenausgleichungen in den GOCA-Ausgleichungsstufen 1 und 2 basiert auf folgendem funktionalen Gauß-Markov-Modell (GMM) (JÄGER et al. 2005) bzw. Verbesserungsgleichungssystem:

$$\text{GNSS-Lagebaselines:} \quad \begin{bmatrix} \Delta x_{ij} \\ \Delta y_{ij} \end{bmatrix}_{\text{GNSS}} + \begin{bmatrix} v_{\Delta x,ij} \\ v_{\Delta y,ij} \end{bmatrix}_{\text{GNSS}} = \begin{bmatrix} \Delta \hat{x}_{ij} \\ \Delta \hat{y}_{ij} \end{bmatrix} \quad (1a)$$

$$\text{Horizontalstrecken:} \quad s_{ij} + v_{s,ij} = s \cdot \sqrt{\Delta \hat{x}_{ij}^2 + \Delta \hat{y}_{ij}^2} \quad (1b)$$

$$\text{Richtungen:} \quad r_{ij} + v_{r,ij} = \arctan\left(\frac{\Delta y_{ij}}{\Delta x_{ij}}\right) - o_i \quad (1c)$$

$$\text{GNSS-Höhenbaselines:} \quad \Delta h_{\text{GNSS},ij} + v_{\Delta h,ij} = \Delta \hat{h}_{ij} \quad (1d)$$

Terrestrische Höhenunterschiede:

$$\begin{aligned} \Delta H_{\text{terr},ij} + v_{\Delta H,ij} = \\ \Delta s_h^m \cdot \Delta \hat{h}_{ij} + (\hat{a}_{00} + \hat{a}_{10} \cdot x_j + \hat{a}_{01} \cdot y_j)^m - (\hat{a}_{00} + \hat{a}_{10} \cdot x_i + \hat{a}_{01} \cdot y_i)^m \end{aligned} \quad (1e)$$

Mit  $m$  werden in (1e) der Gebietsindex, und mit  $\Delta s_h^m$  bzw.  $\mathbf{a}_{ik}^m$  werden die Maßstabsdifferenz bzw. die Flächenpolynomkoeffizienten zur Modellierung der lokalen Höhenbezugsfläche im Gebiet  $m$  bezeichnet. Was GNSS angeht, so kann die GOCA Softwarekomponente GOCA-GNSS-Control (Abb. 4) sowohl im RTK als auch im Nearonline-Modus (RINEX-Daten) arbeiten. Im Ergebnis des Kettenglieds 1 (Abb. 4) werden - neben den terrestrischen Sensordaten (LPS) - bzgl. GNSS die 3D GNSS-Baselines (1a,e) ebenfalls im sog. GKA-Format (JÄGER 1999-2016) zur fortlaufenden Netzausgleichung und Deformationszustandsschätzung an die GOCA-Deformationsanalysesoftware (Kettenglied 2, Abb. 3) weitergereicht. Die 3D-Baselines werden dort in 2D/1D Baselines umgerechnet und nach (1a,e) weiterverarbeitet.

### 3.3 GOCA Ausgleichungsstufe 3 und Deformationszustandsschätzungen

Die Deformationsanalyse in der GOCA-Ausgleichungsstufe 3 beruht auf den simultan aus der online GOCA Netzausgleichungsstufe 2 hervorgehenden Objektpunktzeitreihen und deren Kovarianzmatrizen:

$$\mathbf{x}_O(t) \text{ und } \mathbf{C}_O(t) \quad (2a,b)$$

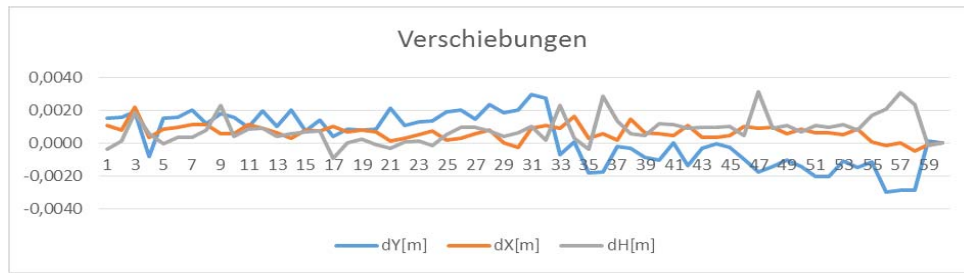
Die Abb. 5 zeigt die Objektpunktzeitreihe  $\mathbf{x}_O(t)$  (2a), dem Resultat der Netzausgleichung in GOCA Stufe 2 am Beispiel Autobahnknoten Prater, Wien.

Bei den erwarteten Bewegungen/Deformationen handelt es sich um einen quasi gleichmäßigen Prozess (Ausnahme sind dabei die letzten Messungen), so dass die gewählte Abtastrate von bzw. in Messepochen 1/Tag ausreichend war.

In GOCA-Stufe 3 sind - basierend auf die Ergebnisse  $\mathbf{x}_O(t)$  und  $\mathbf{C}_O(t)$  (2a,b) der GOCA Stufe 2 und bei individuellen Einstellungen kritischer Werte und statistischer Parameter für die Objektpunkte  $\mathbf{x}_O(t)$ - folgende Onlineschätzungen zur Deformationsanalyse des Objektbereichs als Kleinste-Quadrate sowie als robuste Huber- und L1-Schätzungen möglich:



- Gleitender Mittelwert in Lage und Höhe
- Online Verschiebungsschätzung bei unterschiedlichen Epochendefinitionen (Abb. 6)
- Kalman-Filterung von Verschiebungen, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen (JÄGER & GONZALEZ 2005).



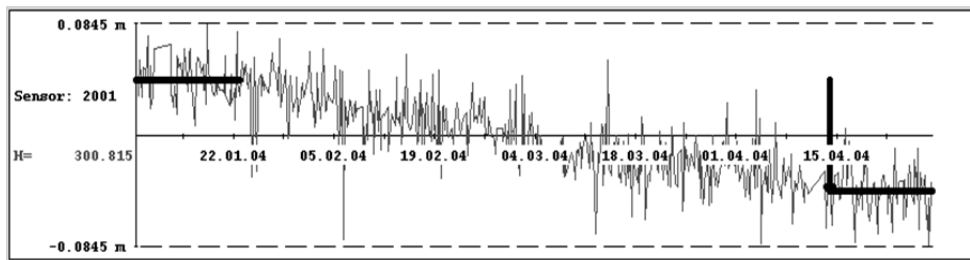
**Abb. 5:** Visualisierung der tageweisen rohen Objektpunktreihen  $\mathbf{x}_O(t)$  (2a) am Beispiel eine Objektpunktes des Geomonitoringnetze Autobahnknoten Prater in Wien

Das funktionale Modell der o.g. Verschiebungsschätzung (Abb. 9) zwischen zwei Epochen und Zeiten  $t_0$  und  $t_i$  lautet:

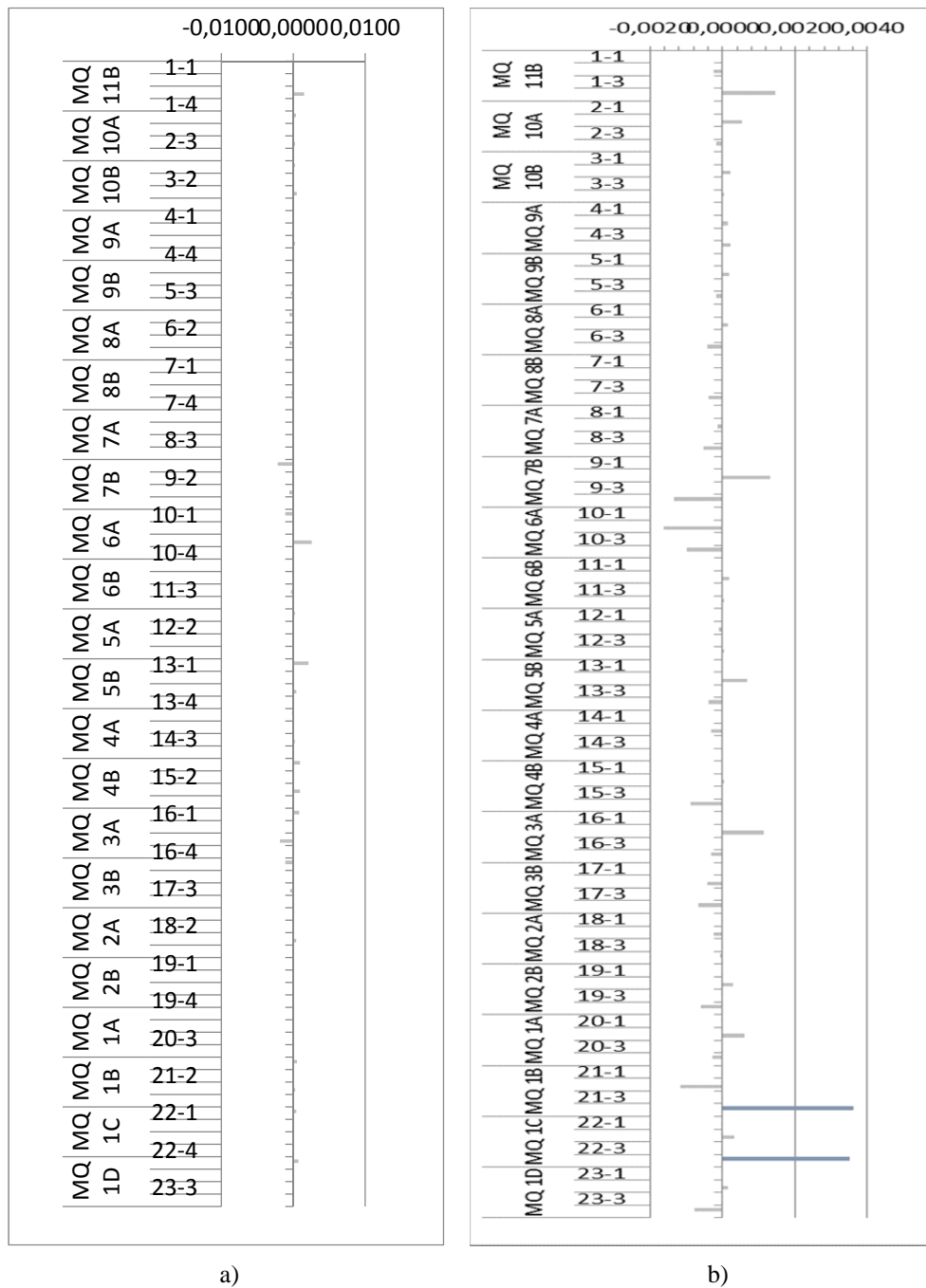
$$\begin{bmatrix} \mathbf{l}_{t_0} \\ \mathbf{l}_{t_i} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{t_0} \\ \mathbf{v}_{t_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{E}_2 & \mathbf{E}_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_0 \\ \hat{\mathbf{u}}(t_0, t_i) \end{bmatrix} = \mathbf{A} \cdot \hat{\mathbf{y}} \quad \text{mit}$$

$$\hat{\mathbf{y}} = [\hat{\mathbf{x}}_0(t_0), \hat{\mathbf{u}}(t_0, t_i)]^T \quad (3a, b)$$

Die Epochenzeiten  $t_0$  und  $t_i$  markieren dabei jeweils die Mitte eines diskreten Epochenintervalls (z.B. 1 h oder 1 Tag, Abb. 6), und die beiden Beobachtungsgruppen  $\mathbf{l}_{t_0}$  und  $\mathbf{l}_{t_i}$  entstammen direkt den Objektpunktzeitreihen  $\mathbf{x}_O(t)$  aus der GOCA-Ausgleichsstufe 2 (2a,b).



**Abb. 6:** GOCA-Visualisierung der Zeitreihe  $\mathbf{x}_O(t)$  eines Objektpunktes (Ausgleichsstufe 2) und der Verschiebungsschätzung (Ausgleichsstufe 3) am Beispiel einer Bergsenkung



**Abb. 7:** Graphische Darstellung der ermittelten Höhenverschiebungen bzw. Setzungen Absolut Vertikal [m] a) und Horizontal [m] b)

Mit  $\mathbf{v}$  werden in (3a,b) die Beobachtungsverbesserungen und mit  $\hat{\mathbf{x}}_0(t_0)$  und  $\hat{\mathbf{u}}(t_0, t_i)$  die Objektpunktposition zum Ausgangszeitpunkt  $t_0$  bzw. die erfolgte Verschiebung zum Zeitpunkt  $t_i$  als Bestandteile des zu schätzenden Parametervektors  $\hat{\mathbf{y}}$  (3b) bezeichnet.

Die GOCA Kalman-Filterung (JÄGER & GONZALEZ 2005, JÄGER 2017) - als weitere Komponente der Zustandsschätzung der GOCA-Stufe 3 im Kettenglied 2 (Abb. 3) - basiert auf der nachfolgenden Zustandsübertragungsmatrix  $\mathbf{T}(t)$  für den Zustandsvektor  $\mathbf{y}(t)$ . Für dessen Übergang vom zurückliegenden  $(t - \Delta t)$  zum gegenwärtigen Zeitpunkt  $t$  gilt:

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{T}(t) \cdot \mathbf{y}(t - \Delta t) \quad \text{mit} \quad (4a)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{u}(t) \\ \dot{\mathbf{u}}(t) \\ \ddot{\mathbf{u}}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & [\Delta t] & \left[ \frac{1}{2} \Delta t^2 \right] \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} & [\Delta t] \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{u}(t - \Delta t) \\ \dot{\mathbf{u}}(t - \Delta t) \\ \ddot{\mathbf{u}}(t - \Delta t) \end{bmatrix} \quad \text{und} \quad (4b)$$

$$\mathbf{y}(t) = [\mathbf{u}(t), \dot{\mathbf{u}}(t), \ddot{\mathbf{u}}(t)]^T. \quad (4c)$$

Der Zustandsvektor umfasst in den Parametern  $\mathbf{y}(t)$  (4c) die 3D-Verschiebungen  $\mathbf{u}(t)$ , die 3D-Geschwindigkeiten  $\dot{\mathbf{u}}(t)$  und die 3D-Beschleunigungen  $\ddot{\mathbf{u}}(t)$  der Objektpunkte  $\mathbf{x}_O(t)$  zwischen aufeinander folgenden Zeitintervallen  $\Delta t$ . Das Zustandsübertragungsmodell (4a, b, c) impliziert eine nach dem zweiten Glied abgebrochene Taylorentwicklung der unbekannteren Verschiebungsfunktion  $\mathbf{u}(t)$ , und somit die Annahme einer im kurzen Filterzeitintervall  $\Delta t$  konstanten Beschleunigung  $\ddot{\mathbf{u}}(t)$ . Diese Annahme ist - durch entsprechend hohe Abstraten oder bei naturgemäß langsam bewegten (quasi-statischen) Vorgängen - im geodätischen Geomonitring vieler Objekte (Bauwerke, Dämme, Hangrutschungen, Bergwerke etc.) nahezu immer realisierbar bzw. gegeben.

Die Kovarianzmatrix  $\mathbf{C}_y$  der Vorhersage  $\mathbf{y}(t)$  (4b) - als stochastische Gauß-Markov-Modell [11] Komponente der aktuellen Schätzung zur Zeit  $t$  - berechnet sich nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz angewandt auf (4b) über die Kovarianzmatrix der vorausgehenden Schätzung des Zustandsvektors  $\mathbf{y}(t - \Delta t)$ . Als Beobachtungskomponente  $\mathbf{I}(t)$  treten zur Kalmanfilterungsvorhersage  $\mathbf{y}(t)$  (4c) mit entsprechender Kovarianzmatrix die auf denselben Zustandsvektor  $\mathbf{y}(t)$  (4c) weisenden GOCA-basierten Verschiebungen  $\mathbf{u}(t)$  im Intervall  $\Delta t$  hinzu. Diese Beobachtungskomponente  $\mathbf{I}(t)$  zur Zeit  $t$  und das stochastische Modell  $\mathbf{C}_l$  lauten:

$$\mathbf{l}(t) = \mathbf{l}(\mathbf{y}(t)) =: \mathbf{u}(t) = \mathbf{x}_O(t) - \mathbf{x}_O(t_0), \quad \text{mit} \quad (4d1)$$

$$\mathbf{C}_l = \mathbf{C}_{x_O}(t) + \mathbf{C}_{x_O}(t_0) \quad (4d2)$$

Die Beobachtungen  $\mathbf{l}(t)$  (4d1) sind dabei die Unterschiede zwischen der gegenwärtigen Objektpunktposition  $\mathbf{x}_O(t)$  (2a,b) aus der GOCA Ausgleichungsstufe 2 (FIN Dateien)

minus der Position  $\mathbf{x}_O(t_0)$  zum Bezugszeitpunkt der Verschiebungen der Kalman-Filterung.

### 3.4 Robuste M-Schätzungen

Sensordatenfehler und systematische Fehler (z.B. fehlerhaften Mehrdeutigkeitslösungen bei GNSS) würden in den vollkommen automatisierten GOCA-Echtzeitausgleichungsstufen 2 und 3 fehlerhafte Ergebnisse in obigen Deformationsanalysen nach sich ziehen. Fehlalarme oder das hohe Risiko von fälschlicher Weise unterdrückten Alarmsituationen bei kritischem Zustand wären die Folgen. Um diese Risiken auszuschließen bzw. möglichst gering zu halten, können die Parameterschätzungen in der GOCA-Deformationsanalyse in den Ausgleichungsstufen 2 und 3 - per Dialog-Einstellungen in der GOCA-Deformationsanalyse-Software (Abb. 3) – anstelle von Kleinsten Quadrate-Schätzungen auch als robuste M-Schätzungen (JÄGER et al. 2005, JÄGER & GONZALEZ 2005) erfolgen.

### 3.5 Aktuelle Fortentwicklungen des GOCA-Systems

Die aktuellen Fortentwicklungen der GOCA-Software umfassten 2016 die Implementierung einer quasi-integrierten 3D-Netzausgleichung (JÄGER, 2017) im Geometrie- und Schwererraum. Die 2D/1D-Modellbildung (1a-e) bleibt dabei unverändert bestehen, z.B. um auch weiterhin 1D Nivellementsnetze behandeln zu können. Das quasi- sowie das voll integrierte 3D-Modell können im Gegensatz zum 1D/2D-Modell sowie sog. „geometrischen“ 3D-Modellen alle verfügbare Geoinformation und Sensordaten – d.h. Schwerefeldmodelle (z.B. EGM 2008), Gravimetrie, GNSS, Totalstationen (TPS), Nivellement, Laserscanner, Radarsensorik, geotechnische Sensoren bis hin zu den photogrammetrischen Daten moderner Videotachymeter – beim Geomonitoring geodynamischer, natürlicher sowie bauwerklicher Vorgänge bzw. Objekte parametrisieren. Daher kommt den beiden o.g. integrierten 3D-Modellen in den aktuellen und zukünftigen Forschungen und Entwicklungen eine Schlüsselrolle zu. Die 3D-Modellbildung wird im Beitrag (JÄGER, 2017) behandelt.

## Zusammenfassung

Das vorliegende Projekt am Knoten Prater in Wien zeigt deutlich, dass der vollautomatisierte Betrieb eines Geomonitoringsystems mit Hilfe des Geomonitoringsystems und der Softwarekomponenten von GOCA möglich ist. Das Geomonitoring selbst dient dabei primär zur Abschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit eines Schadens. Die Ergebnisse stehen in Echtzeit und dann - ermöglicht durch das Internet - an quasi jedem Ort der Erde zur Verfügung.

Die Bestimmung geometrischer Veränderungen bzw. 3D-Deformationen in Form von Setzungen und Lageverschiebungen sowie deren zeitlicher Ablauf waren bei diesem Projekt von besonderem Interesse, da einerseits die Sicherheit des Personals auf der Baustelle und andererseits die sichere und von der Baustelle unbeeinflusste Fahrt der U-Bahnlinien zu gewährleisten war.

Besonders erwähnt sei hier auch die außerordentlich hohe Wirtschaftlichkeit des Messsystems, insbesondere der geringe Aufwand für das Erfassen vieler Messzyklen bei gering-

stem zeitlichem und personellem Mitarbeiterinsatz. So ermöglichte das messtechnische On-Line Monitoring Bauarbeiten beim laufenden Betrieb von ÖBB-Zügen und U-Bahnlinien.

Ausgehend davon kann nun die Vollautomatisierung der Epochenmessungen als Schritt 1 der Geomonitorkette (Abb. 3) im Fall von Tachymetersensoren (TPS) durch Verwendung mehrerer simultan beobachtender ATR-Tachymeter mit Aufsatzprismen und einer WLAN-Datenübertragung an die für Schritte 2, 3 und 4 verantwortlichen weiteren GOCA-Softwarekomponenten erreicht werden.

Beim Einsatz automatisierter Geomonitoringsysteme wie GOCA ist es jedoch wichtig zu beachten, dass der Geodät als Experte in Planung und Durchführung nicht ersetzt werden kann, sondern, dass er in seiner Leistungsfähigkeit hier nur essentiell bereichert und unterstützt wird.

## Literatur

- GEOTECHNISCHER SICHERHEITSMANAGEMENTPLAN, Bericht: BGG Consult, Wien, 2012.
- ÜBERSCHÜTTUNG STARTSCHACHT UND TÜBBINGTUNNEL U2/5 - ERMITTLUNG VON WARN- UND ALARMWERTEN FÜR DIE SETZUNGEN, 20.03.2013, iC Consulanten ZT GmbH Wien, 2013.
- PROJEKT: ASFINAG - A4/A23 - Knoten Prater Warn- und Alarmwerte- Tecton Consult Engineering ZT GmbH, 2012.
- JÄGER, R. (2014):\_GNSS/GPS based Online Control and Alarm System (GOCA) - Weiterentwicklungen zum Integrierten Geomonitring mit LowCost GNSS und inertialen MEMS-Sensoren. Proceedings IX. Mittweidaer Talsperrentag 2014. Mittweida, 14.-15. Mai 2014. Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule Mittweida. R. 1 2014. ISSN 1437-7624. S. 21-33.
- JÄGER, R. (1999-2016): [www.goca.info](http://www.goca.info). GOCA-Website. URL: [www.goca.info](http://www.goca.info).
- KABASHI, I., RAGOSSNIG-ANGST, M. UND R. JÄGER (2011): Geodätisches Online-Monitoring von alten Bauwerken in gefährdungskritischem Zustand im Zuge von Sanierungen. 16. Internationale Geodätische Woche Obergurgl 2011.Grimm-Pitzinger, A.; Weinold, T. (Hrsg.) Wichmann Verlag, Heidelberg. ISBN 978-3-87907-505-8.S. 53-65.
- KABASHI, I., ANGST, J., RAGOSSNIG-ANGST, M., JÄGER, R. UND P. SPOHN (2013): Automatisiertes geodätisches Monitoring an den Staudämmen Jablanica, Grabovica und Salakovac. (In: Hanke, K.; Weinold, T. Hrsg.). 17. Internationale Geodätische Woche Obergurgl 2013. Wichmann. ISBN 978-3-87907-526-3.
- PELZER, H. (1976): Zur Analyse von permanent registrierten Deformationen. Proceedings VII Course on Engineering Survey with High Precision. Darmstadt. S. 781-796.
- PELZER, H. (1971): Zur Analyse geodätischer Deformationsmessungen, DGK, Reihe C, Heft 164, München.
- KÄLBER, S. and R. JÄGER (2000): Realization of a GPS-based Online Control and Alarm System (GOCA) and Preview on Appropriate System Analysis Models for an Online Monitoring. Proceedings 9<sup>th</sup> FIG-Symposium on Deformation Measurement and Analysis. Sept. 1999, Olsztyn, Poland. p. 98 -117.

- JÄGER, R., MÜLLER, T., SALER, H. und R. SCHWÄBLE (2005): Klassische und robuste Ausgleichungsverfahren - Ein Leitfaden für Ausbildung und Praxis von Geodäten und Geoinformatikern. Wichmann-Verlag, Heidelberg. ISBN 3-87907-370-8.
- JÄGER, R. and F. GONZALEZ (2005): GNSS/GPS/LPS based Online Control and Alarm System (GOCA) - Mathematical Models and Technical Realisation of a System for Natural and Geotechnical Deformation Monitoring and Hazard Prevention. ISGDM IAG-Symposium 2005. University of Escuela Politécnica Superior de Jaén. Spain. (F. Sanso and A. J. Gil (Eds.): Geodetic Deformation Monitoring: From Geophysical to Engineering Roles. IAG Series on Geodesy Symposia. Springer Heidelberg and New York. ISBN 3-540-38595-9. S. 293 – 304.
- JÄGER, R. (2014): Modellbildung und Realisierung eines Systems zum Geomonitoring in Bauwesen, Geotechnik und Naturkatastrophenschutz. Proceedings 9. Kolloquium Bauern 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. (2017): GNSS/LPS/LS based Online Control and Alarm System (GOCA) – Integrierte 3D-Ausgleichung als Schlüssel zum multisensorischen Geomonitoring im Geometrie- und Schwererraum. Dieser Band.