

Auswerte- und Analysestrategie für automatisierte untertägige Überwachungsmessungen

Michael Lösler¹, Cornelia Eschelbach¹, Focke Jarecki²

¹Frankfurt University of Applied Sciences,
Fachbereich 1: Architektur, Bauingenieurwesen, Geomatik, Labor für Industrielle Messtechnik

² Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH, Peine, Fachbereich Geoinformation

ZUSAMMENFASSUNG:

Das Überwachen von Objekten zählt nach DIN 18710 neben der Aufnahme und Absteckung zu den Kernaufgaben der Ingenieurgeodäsie. Das Prüfen auf geometrische, räumliche aber auch zeitliche Objektvariationen im Rahmen der Kongruenzanalyse erlaubt im Hinblick auf bergbauliche Aktivitäten eine Beurteilung der geomechanischen Situation bzw. Modellierung und ermöglicht die Optimierung von Auffahrungs- und Ausbauarbeiten. Für das automatisierte untertägige Monitoring im Rahmen eines umfangreichen geotechnischen Überwachungsprogramms beim Bau des Endlagers Konrad (Salzgitter) wird u.a. auf überkopfhängende Tachymeter zurückgegriffen. Bedingt durch die nicht-spezifizierte Lagerung der Instrumente sind in der epochalen Netzausgleichung zusätzliche Integrationsparameter zu parametrisieren, die die verbleibenden Stehachsrestneigungen berücksichtigen. Während üblicherweise der Epochenvergleich auf den ausgeglichenen Koordinaten der Einzelepochen beruht, findet hier ein Analysekonzept Anwendung, welches auf den originären Beobachtungen basiert. Die Integration des allgemeinen Data-Snoopings ermöglicht in diesem Konzept sowohl das Auffinden von Beobachtungsfehlern als auch das Detektieren und Identifizieren von Punktverschiebungen.

ABSTRACT:

The core competencies in the field of applied engineering geodesy w.r.t. DIN 18710 are surveying and staking out of objects, as well as deformation analysis. The congruence analysis, as the main part of the deformation analysis, allows for identifying spatial, geometrical and temporal changes of objects. In mining industry, the results of a convergence monitoring are used to evaluate the geo-mechanical properties of the underground as well as to validate geo-dynamic models. Moreover, results of the congruence analysis can be used to optimize workflows, too. At the former iron ore mine Konrad (Salzgitter). which is

being converted into the German repository for nuclear waste with negligible heat generation currently, a complex automated and continual monitoring system is established, which includes over-head mounted total stations. Due to the non-specific mount, the onboard tilt compensator cannot be used to level up the instruments. Thus, the inclination angles of the instruments w.r.t. the global reference frame must be parameterized within the network adjustment process. This concept is known as integrated network adjustment. To evaluate the stability of the reference points of the global frame and to derive convergences, a congruence analysis is used. Whereas usually deformations are derived from the results of independent single adjustments, we present a congruence model that combines the different original observation sets in one unified model. By applying the statistical toolbox of Baarda's Data-Snooping method, outliers as well as point deformations can be identified.

1 Konvergenzmessungen im Schacht Konrad

Die Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) betreibt die Schachanlage Konrad (Salzgit-ter), welche gegenwärtig zum Endlager für radioaktive Stoffe mit vernachlässigbarer Wärmeent-wicklung umgebaut wird. Zur baubegleitenden Überwachung ist ein umfangreiches Monitoringkon-zept vorgesehen, welches neben eindimensionalen Sensoren wie Extensometern oder Konvergenz-messbändern auch die Verwendung von automatisierten Tachymetern zur räumlichen Erfassung von Konvergenzpunkten vorsieht. Insbesondere während der Bauphase sind Messungen von Kon-vergenzhorizonten mit konventionellen Konvergenzmessbändern nicht möglich, sodass hier auf elektro-optische Sensoren zurückzugreifen ist (vgl. Busse und Jarecki 2017).

Die klassische Deformationsanalyse nach DIN 18710 beschreibt Überwachungsmessung i.A. als Präventivmaßnahme, um frühzeitig geometrische, räumliche aber auch zeitliche Veränderungen an Objekten und Anlagen festzustellen, die bspw. zum Versagen eines Bauwerks führen können. Hier-zu werden üblicherweise messtechnisch erfasste Veränderungen mit statistischen Methoden auf Signifikanz geprüft und bewertet. Die wesentliche Zielsetzung besteht somit in einem frühzeitigen, gesicherten Detektieren von kleinen Objektveränderungen.

Im Gegensatz zu dieser klassischen Definition dient das hier konzipierte und eingesetzte Monito-ringsystem neben der Erhebung von Daten zur Kalibrierung des gebirgsmechanischen Modells vor allem zum Erkennen der Abklingphase der auftretenden Konvergenzen. Im Rahmen des Schacht-ausbaus werden Konvergenzen von 50 cm und mehr erwartet. Diese müssen weitgehend abgeklun-gen sein, bevor mit dem endgültigen Innenausbau begonnen wird. Eine der wesentlichen Zielset-zungen ist somit das Identifizieren des Zeitpunktes, ab dem keine Veränderungen mehr nachweisbar sind. Es handelt sich somit um eine inverse Problemstellung. Veränderungen an Punkten oder Ob-jekten lassen sich nur relativ zu einem als stabil angenommenen Referenzpunktfeld angeben. Die Überwachung dieses Referenzpunktfeldes ist somit evident, um Missinterpretationen bzgl. vorhan-denerer Konvergenzen vorzubeugen.

Eine besondere messtechnische Herausforderung ergibt sich durch den geplanten Baufortschritt, der eine ebenengleiche Erfassung auf Höhe des Baubetriebs verhindert und nur eine Erfassung von Ta-chymeterhorizonten von oben herab zulässt. Konstruktionsbedingt ist der Arbeitsbereich des Verti-kalwinkels durch den Limbus des Instruments begrenzt, vgl. Abb. 1. Moderne Totalstationen besit-

zen einen Messbereich von etwa $\pm 145^\circ$. Um Messungen zu realisieren, die sich vorrangig im Bereich des Nadirs befinden, ist ein Überkopfbetrieb vorgesehen (vgl. Busse und Jarecki 2017). Durch den Betrieb in nicht-spezifizierter Position lässt sich das Instrument zum einen nicht hinreichend horizontieren, und zum anderen ist der Einsatz des integrierten Flüssigkeitskompensators zur Überwachung und Ausgleichung der Stehachsneigung nicht möglich. Die Stehachse des Instrumentes kann daher nicht als parallel zur (lokalen) Lotrichtung angenommen werden.

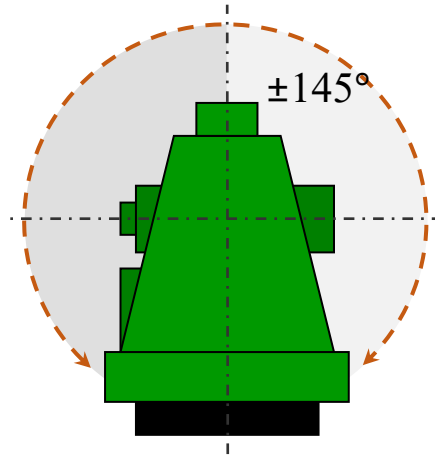


Abb. 1: Schematische Darstellung des Arbeitsbereiches des Vertikalwinkels von Tachymetern.

Möser und Knoblach (2012) schlagen zur Bestimmung und Kompensation der Stehachsrestneigung im Überkopfbetrieb den Einsatz eines externen Neigungssensors vor. Der Einsatz zusätzlicher Sensorik erhöht jedoch auch den Wartungsaufwand. Insbesondere ein schneller Austausch des Messinstrumentes ist aufgrund der durchzuführenden Kalibrierung problematisch, sodass auf den Einsatz zusätzlicher Sensoren hier verzichtet wird, und eine mögliche Stehachsrestneigung während der Auswertung zu berücksichtigen ist. Eine detaillierte Beschreibung der eingesetzten Messsensorik und -konfiguration kann Busse und Jarecki (2017) und Jarecki et al. (2018) entnommen werden.

2 Modellbildung und Analysemethoden

In der industriellen Messtechnik erfolgt die Datenerhebung und -auswertung üblicherweise in einem Objektkoordinatensystem ohne Bezug zum Erdschwerefeld (Lösler 2009; Lösler et al. 2015). Während die dort eingesetzten Algorithmen üblicherweise koordinatenbasiert arbeiten (z.B. Calkins 2002), soll im Folgenden ein Auswertekonzept auf der Basis der originären Beobachtungen vorgestellt werden, welches Stehachsrestneigungen des Instrumentes in-situ berücksichtigt. Durch die Integration des Konzeptes des allgemeinen Data-Snoopings lassen sich etwaige Modellstörungen aufdecken. Unter Modellstörungen werden hierbei sowohl Abweichungen verstanden, die bspw. aus Fehlmessungen resultieren, als auch Veränderungen in den als stabil angenommenen Referenzpunkten.

2.1 Modell zur integrierten Netzausgleichung

Während in der industriellen Messtechnik traditionell koordinatenbasierte Ausgleichungsalgorithmen entwickelt und eingesetzt werden, die ein Umrechnen der polaren Messelemente in kartesische

Koordinaten erfordern (vgl. Calkins 2002; Lösler und Eschelbach 2012), werden in der angewandten Geodäsie üblicherweise Ausgleichungsmodelle eingesetzt, die die originären Beobachtungen zugrunde legen. Diese Modellbildung wird auch als integrierte hybride Netzausgleichung bezeichnet, da sie eine direkte Kombination der geodätischen Messsysteme wie bspw. Nivellement, Tachymetrie oder GNSS streng ermöglicht (z.B. Jäger et al. 2017). Werden ausschließlich tachymetrische Daten in einem Raumnetz ausgewertet, so liefern beide Ansätze äquivalente Lösungen, sofern das stochastische Modell streng berücksichtigt wird (Lösler und Eschelbach 2012). Differenzen zwischen beiden Ansätzen können sich vor allem im Rahmen der Datenaufbereitung und –analyse ergeben. Während in der integrierten Netzausgleichung die originären Beobachtungen zu bewerten sind, erfolgt die koordinatenbasierte Ausgleichung auf der Basis abgeleiteter Größen. Eine signifikante Modellstörung in einer Polarkomponente z.B. der Schrägstrecke führt im integrierten Ansatz zur direkten Lokalisierung und ermöglicht ein gezieltes Eingreifen bspw. den Ausschluss dieser Beobachtung von der weiteren Auswertung. Im koordinatenbasierten Ansatz wirkt sich dieselbe Modellstörung i.d.R. auf alle drei Koordinatenkomponenten aus. Eine Lokalisierung der Ursache ist zwar möglich, ein gezieltes Eingreifen wird aber deutlich erschwert. Üblicherweise wird der gesamte Punkt von der weiteren Auswertung ausgeschlossen, sodass im Vergleich zur integrierten Modellbildung unmittelbar auch unauffällige Beobachtungen gestrichen werden, wodurch sich unterschiedliche Resultate in den Netzausgleichungen ergeben. Ein direkter Vergleich zwischen beiden Modellansätzen führt dann zwangsläufig zu differierenden Lösungen (z.B. Herrmann et al. 2014).

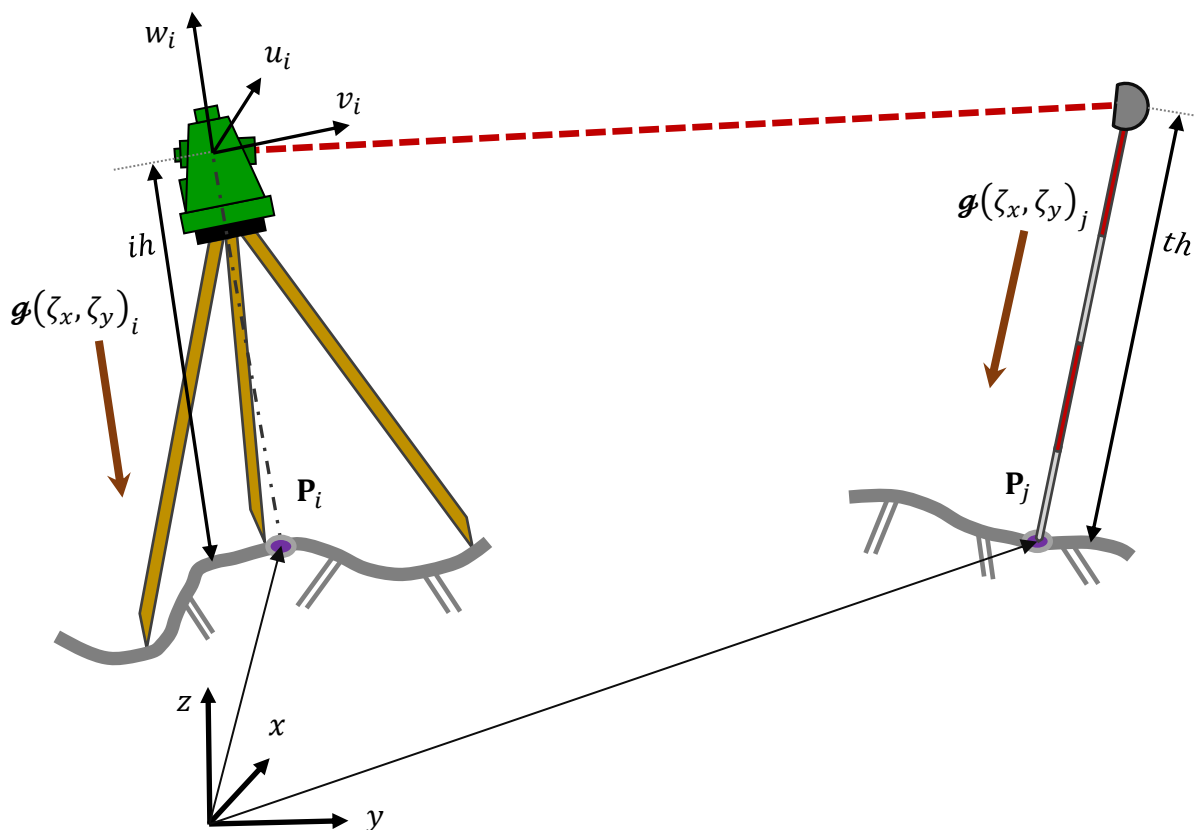


Abb. 2: Beziehungen zwischen dem übergeordneten Referenzrahmen und lokal-astronomischen Koordinatensystemen mit unterschiedlich orientierten Lotrichtungen.

Das Vorliegen einer Modellstörung in einer Beobachtung ist nur ein Beispiel, das die Unterschiede in den Herangehensweisen beider Konzepte verdeutlichen soll. Die Liste ließe sich erweitern bspw.

um das Ableiten eines repräsentativen stochastischen Modells für die Beobachtungen oder die Varianz-Komponenten-Schätzung. Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die hierfür notwendigen Größen in beiden Modellansätzen schätzbar sind. Der Aufwand unterscheidet sich aber deutlich, weshalb in Programmpaketen der industriellen Messtechnik diese Kenngrößen häufig nicht bestimmt werden.

Für die Modellbildung der integrierten Netzausgleichung sind die lokal-astronomischen Koordinatensysteme der einzelnen Standpunkte mit dem übergeordneten Referenzrahmen zu verknüpfen, vgl. Abb. 2. Diese Verknüpfung zwischen beiden Koordinatensystemen ergibt sich unmittelbar aus der Transformation

$$\mathbf{l}_{i,j} = \begin{pmatrix} \Delta v \\ \Delta u \\ \Delta w \end{pmatrix}_{i,j} = \mathbf{R}_s \begin{pmatrix} \Delta y \\ \Delta x \\ \Delta z \end{pmatrix}_{i,j} - \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ ih \end{pmatrix}_i + \mathbf{R}_s \mathbf{R}_T^{-1} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ th \end{pmatrix}_j. \quad 1$$

Hierin sind ih und th die Instrumenten- bzw. Reflektorhöhen, $(\Delta y \ \Delta x \ \Delta z)^T$ der Vektor der Koordinatendifferenzen im globalen Referenzrahmen und $(\Delta v \ \Delta u \ \Delta w)^T$ der korrespondierende Vektor der Koordinatendifferenzen im lokal-astronomischen Koordinatensystem des Standpunktes. Die unterschiedlichen Orientierungen der Stehachsen aufgrund von Lotabweichungen \mathcal{J} werden durch die Rotationssequenzen \mathbf{R}_s und \mathbf{R}_T für den Stand- bzw. Zielpunkt berücksichtigt. Beide Rotationssequenzen beschreiben hierbei eine kombinierte Drehung um die x - und y -Achse

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \zeta_x & -\sin \zeta_x \\ 0 & \sin \zeta_x & \cos \zeta_x \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \zeta_y & 0 & \sin \zeta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \zeta_y & 0 & \cos \zeta_y \end{pmatrix} \quad 2$$

worin ζ_x bzw. ζ_y die zugehörigen Drehwinkel darstellen (z.B. Jäger et al. 2017).

Die resultierenden Beobachtungsgleichungen im lokal-astronomischen Koordinatensystem des Standpunktes ergeben sich zu

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

$$t_{ij} = \text{atan}_2 \frac{\Delta v}{\Delta u} - o, \quad 4$$

$$v_{ij} = \text{atan}_2 \frac{\sqrt{\Delta v^2 + \Delta u^2}}{\Delta w} \quad 5$$

für Schrägstrecke, Richtung und Zenitwinkel. Hierin ist o die Orientierungsunbekannte, die die in Gl (2) noch fehlende dritte Drehung um die z -Achse einer räumlichen Koordinatentransformation beschreibt.

Da die originären Beobachtungen als unabhängige Funktionen der unbekannten Parameter darstellbar sind, erfolgt die Netzausgleichung nach der Methode der kleinsten Verbesserungsquadratsumme im Gauß-Markov-Modell. Das funktionale Modell lautet (z.B. Jäger et al. 2005, S. 159ff; Niemeier 2008, S. 137ff)

$$\mathbf{l} + \mathbf{v} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} \quad 6$$

und das zugehörige stochastische Modell ergibt sich zu

$$\mathbf{C}_{\Pi} = \sigma_0^2 \mathbf{Q}_{\Pi}. \quad 7$$

Hierin sind \mathbf{A} die $n \times u$ Konfigurations- oder Designmatrix, \mathbf{l} der $n \times 1$ Vektor der Beobachtungen und \mathbf{v} die zugehörigen Beobachtungsresiduen. Das stochastische Modell ergibt sich aus der a-priori Kovarianzmatrix der Beobachtungen \mathbf{C}_{Π} , welche üblicherweise in eine Kofaktormatrix \mathbf{Q}_{Π} und einen frei wählbaren Varianzfaktor σ_0^2 zerlegt wird. Der $u \times 1$ Vektor $\hat{\mathbf{x}}$ enthält die festen aber unbekannten Modellparameter.

Da die Gl (3), (4) und (5) nur relative geometrische Beziehungen zwischen Stand- und Zielpunkt beschreiben, besitzt \mathbf{A} in Gl (6) keinen vollen Spaltenrang, sodass das Gleichungssystem unterbestimmt bzw. singular ist. Zur Behebung dieses sogenannten Datumsdefektes d existieren verschiedene Ansätze. In der Ingenieurgeodäsie und insbesondere im Kontext der Kongruenzanalyse werden üblicherweise d zusätzliche linear-unabhängige Bedingungsgleichungen aufgestellt,

$$\mathbf{G}^T \hat{\mathbf{x}} = \mathbf{g}, \quad 8$$

und das Normalgleichungssystem mithilfe der Lagrange-Funktion unter Einführung der Korrelaten \mathbf{k} gelöst.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}^T \mathbf{Q}_{\Pi}^{-1} \mathbf{A} & \mathbf{G} \\ \mathbf{G}^T & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}} \\ \mathbf{k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}^T \mathbf{Q}_{\Pi}^{-1} \mathbf{l} \\ \mathbf{g} \end{bmatrix} \quad 9$$

Durch Auflösen von Gl (9) ergibt sich der gesuchte Parametervektor $\hat{\mathbf{x}}$ sowie die zugehörige Kofaktormatrix $\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}}}$. Liegt eine hinreichend große Stichprobe \mathbf{l} vor, lässt sich mit

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{\mathbf{v}^T \mathbf{Q}_{\Pi}^{-1} \mathbf{v}}{n - u + d} = \frac{\Omega}{r} \quad 10$$

eine Schätzung für den a-posteriori Varianzfaktor angeben, der anstelle von σ_0^2 zur Skalierung von $\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}}}$ herangezogen werden kann. Für Gleichungssysteme mit geringer Gesamtredundanz r ist die Verwendung von σ_0^2 zu empfehlen (vgl. Lösler et al. 2016).

2.2 Behandlung von Modellstörungen

Die Bildung des stochastischen und funktionalen Modells hat das Ziel, ein beobachtetes Phänomen mathematisch in geeigneter Weise zu beschreiben. Da das wahre Modell i.A. unbekannt ist, handelt es sich hierbei um eine Approximation. Unzureichende Annahmen bei der Modellbildung können zu unerwünschten Resultaten führen. So kann das Fehlen eines notwendigen Modellparameters im funktionalen Modell einen unerwarteten Anstieg der Residuen hervorrufen. Auf der anderen Seite ist die Anzahl der modellierbaren Parameter durch die Forderung $r \geq 0$ begrenzt, sodass a-priori

nicht jede mögliche Parametrierung berücksichtigt werden kann. Üblicherweise wird man bestrebt sein, eine Balance zwischen der Anzahl der Modellparameter und der Anpassungsgüte zu finden.

Neben möglichen Fehlannahmen, die bereits beim Aufstellen des Modells getroffen werden könnten, liegt eine unzureichende Modellparametrisierung auch dann vor, wenn inkonsistente Daten im Beobachtungsvektor enthalten sind. Diese nicht-modelkonformen Beobachtungen führen zu Spannungen, die durch die Integration von zusätzlichen Modellparametern \mathbf{V} aufgelöst werden können. Inkonsistente Beobachtungen treten meist unerwartet auf, sodass sie bei der Modellbildung a-priori unberücksichtigt bleiben. Zum Detektieren und Identifizieren von nicht-modelkonformen Beobachtungen wird – nicht nur in der Geodäsie – auf statistische Werkzeuge wie den Hypothesentest zurückgegriffen (z.B. Lehmann und Lössler 2016). Hierzu wird sukzessiv ein Störparameter $\nabla_{i,j}$ in der zu prüfenden Beobachtungsgleichung als zusätzliche Unbekannte modelliert und auf Signifikanz getestet. Das um Störparameter \mathbf{V} erweiterte Modell lautet allgemein

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}^T \mathbf{Q}_{\text{II}}^{-1} \mathbf{A} & \mathbf{A}^T \mathbf{Q}_{\text{II}}^{-1} \mathbf{B} \\ \mathbf{B}^T \mathbf{Q}_{\text{II}}^{-1} \mathbf{A} & \mathbf{B}^T \mathbf{Q}_{\text{II}}^{-1} \mathbf{B} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}} \\ \hat{\mathbf{v}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}^T \mathbf{Q}_{\text{II}}^{-1} \mathbf{l} \\ \mathbf{B}^T \mathbf{Q}_{\text{II}}^{-1} \mathbf{l} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

worin die Matrix $\mathbf{B}_{i,j}^T = (0 \quad \cdots \quad 1_j \quad \cdots \quad 0)$ ein Nullvektor ist, der lediglich an der Stelle des zu prüfenden funktionalen Zusammenhangs die Zahl Eins enthält. Das sukzessive Integrieren eines Zusatzparameters erfordert formal das n -fache Lösen von Gl (11). Da zunächst jedoch ausschließlich die Größe von \mathbf{V} zu bewerten ist, kann Gl (11) mittels Gauß'scher Elimination auf die Schätzung der Zusatzparameter reduziert werden, sodass ein explizites Auflösen von Gl (11) entfallen kann (vgl. Jäger et al. 2005, S. 185f). Liegen die Ergebnisse einer Initialausgleichung ohne zusätzliche Störgrößen vor, so ergeben sich die Zusatzparameter aus

$$\hat{\mathbf{v}} = \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{v}}\hat{\mathbf{v}}} \mathbf{B}^T \mathbf{Q}_{\text{II}}^{-1} \mathbf{v}, \quad (12)$$

worin

$$\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{v}}\hat{\mathbf{v}}} = (\mathbf{B}^T \mathbf{Q}_{\text{II}}^{-1} \mathbf{Q}_{\text{vv}} \mathbf{Q}_{\text{II}}^{-1} \mathbf{B})^{-1} \quad (13)$$

die Kofaktormatrix von $\hat{\mathbf{v}}$ und $\mathbf{Q}_{\text{vv}} = \mathbf{Q}_{\text{II}} - \mathbf{A} \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}}} \mathbf{A}^T$ Kofaktormatrix der Beobachtungsresiduen sind.

Mit dem Erwartungswert $E\{\hat{\mathbf{v}}\} = \mathbf{0}$ lässt sich die Nullhypothese, die geschätzten Abweichungen sind rein zufällig und eine Integration von \mathbf{V} führt zu keiner Modellverbesserung, gegen die unspezifische Alternativhypothese $E\{\hat{\mathbf{v}}\} \neq \mathbf{0}$ testen. Die auf σ_0^2 bezogene Fisher-verteilte Teststatistik der Nullhypothese lautet

$$T_{\text{prio}} = \frac{\hat{\mathbf{v}}^T \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{v}}\hat{\mathbf{v}}}^{-1} \hat{\mathbf{v}}}{m \sigma_0^2} \sim F_{m,\infty} | H_0. \quad (14)$$

Liegt mit Gl (10) eine zuverlässige Schätzung für σ_0^2 vor, so kann alternativ auf die $\hat{\sigma}_0^2$ bezogene Teststatistik

$$T_{post} = \frac{\hat{\mathbf{v}}^T \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{v}}\hat{\mathbf{v}}}^{-1} \hat{\mathbf{v}}}{m \hat{\sigma}_0'^2} \sim F_{m, r-m} | H_0 \quad 15$$

zurückgegriffen werden, worin der Freiheitsgrad $m = \text{rg}(\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{v}}\hat{\mathbf{v}}})$ und $\hat{\sigma}_0'^2 = \frac{\Omega - \hat{\mathbf{v}}^T \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{v}}\hat{\mathbf{v}}}^{-1} \hat{\mathbf{v}}}{r-m}$ der um den Einfluss der geschätzten Störgröße $\hat{\mathbf{v}}$ bereinigte a-posteriori Varianzfaktor sind (vgl. Lehmann und Lösler 2016).

Dieses Konzept, welches in der Geodäsie auch als allgemeines Data-Snooping bezeichnet wird (vgl. Baarda 1968), lässt sich leicht auf das Aufdecken von instabilen Referenzpunkten im Rahmen einer Kongruenzanalyse übertragen. Im Folgenden beschränken wir die Darstellung aus Gründen der Übersichtlichkeit auf die Analyse von zwei Messepochen. Eine Übertragung auf weitere Epochen ist jedoch problemlos möglich. Weiterhin wird unterstellt, dass für die Einzelepochen ein repräsentatives stochastisches Modell vorliegt und diese keine kontaminierten Daten, also insbesondere keine groben Fehler oder systematische Abweichungen mehr enthalten.

Liegen von einem Überwachungsnetz, in dem keine Punktveränderungen stattgefunden haben, die Messungen \mathbf{l}_1 und \mathbf{l}_2 von zwei Epochen vor, so lautet das gemeinsame Ausgleichungsmodell

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}_{R,1} & \mathbf{A}_{Z,1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{A}_{R,2} & \mathbf{0} & \mathbf{A}_{Z,2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_R \\ \hat{\mathbf{x}}_{Z,1} \\ \hat{\mathbf{x}}_{Z,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{l}_1 \\ \mathbf{l}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{v}_1 \\ \mathbf{v}_2 \end{bmatrix}. \quad 16$$

Hierin sind \mathbf{A} und \mathbf{x} so vorsortiert, dass epochenübergreifende Parameter wie bspw. Referenzpunkte am Anfang und epochenspezifische Parameter wie bspw. Orientierungsunbekannten der Richtungsätze, am Ende zu finden sind. Um zu prüfen, ob die Annahme bzgl. invarianter Referenzpunkte gerechtfertigt ist, ist Gl (16) entsprechend den o.g. Ausführungen wiederum um Störparameter \mathbf{v} zu erweitern, vgl. Gl (11). Während beim Prüfen auf inkonsistente Beobachtungen stets nur ein einziger funktionaler Zusammenhang berücksichtigt wurde, berücksichtigt die Matrix \mathbf{B} hier alle funktionalen Zusammenhänge, an denen der zu prüfende i -te Referenzpunkt beteiligt ist,

$$\mathbf{B}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{A}_{Ri,2} \end{bmatrix}. \quad 17$$

Hierin enthält $\mathbf{A}_{Ri,2}$ die korrespondierenden Koeffizienten der partitionierten Designmatrix $\mathbf{A}_{R,2}$ der zweiten Epoche des i -ten Referenzpunktes. Die geschätzten Verschiebungsbeträge $\hat{\mathbf{v}}_i$ sind wiederum statistisch mittels Gl (14) bzw. Gl (15) zu bewerten. Die Schätzung der Modellparameter, das Identifizieren von inkonsistenten Beobachtungen und die Stabilitätsanalyse der Referenzpunkte erfolgen somit geschlossen im selben Ausgleichungsmodell (vgl. Lösler et al. 2017).

Punkte, die a-priori z.B. durch eine Voranalyse als instabil klassifiziert wurden wie bspw. Punkte des Konvergenzhorizonts (Objektpunkte), liegen in Gl (16) epochengetrennt in \mathbf{A}_Z bzw. \mathbf{x}_Z vor. Die resultierenden Verschiebungsvektoren dieser Punkte zwischen beiden Epochen ergeben sich somit direkt aus

$$\hat{\mathbf{V}} = \mathbf{F} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_{Z,1} \\ \hat{\mathbf{x}}_{Z,2} \end{bmatrix} \quad 18$$

mit der Koeffizientenmatrix $\mathbf{F} = [\mathbf{0} \quad -\mathbf{I}_1 \quad \mathbf{0} \quad \cdots \quad \mathbf{0} \quad \mathbf{I}_2 \quad \mathbf{0}]$, die aus Nullmatrizen besteht und lediglich an den Stellen der korrespondierenden Objektpunkte in der ersten bzw. zweiten Epoche mit Einheitsmatrizen besetzt ist. Durch Anwendung des allgemeinen Varianz-Kovarianz-Fortpflanzungsgesetzes ergibt sich die zur Bildung der Teststatistiken, vgl. Gl (14) und (15), notwendige Kofaktormatrix

$$\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{V}}\hat{\mathbf{V}}} = \mathbf{F}\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}}}\mathbf{F}^T. \quad 19$$

Durch einen Austausch von \mathbf{F} in den Gl (18) und (19) können weitere Deformationsmuster wie bspw. Blockbewegungen oder Strains analysiert werden (vgl. Lösler et al. 2017; Lehmann und Lösler 2017).

3 Modellvalidierung

Die im Abschnitt 2 hergeleiteten Modelle sind in der Ausgleichungssoftware Java·Applied·Geodesy·3D (JAG3D¹) realisiert. Deren Eignung soll im Folgenden an zwei Validierungsdatensätzen demonstriert werden. Für die Bewertung der integrierten hybriden Netzausgleichung wird auf einen Testdatensatz des Deutschen Elektronen-Synchrotron (DESY) zurückgegriffen, der zur Ergebnisvalidierung verschiedener Softwarepakete erstellt wurde (Radomi und Schlösser 2010). Für die Validierung der Beobachtungsmethode im Kontext der Kongruenzanalyse wird auf einen in Caspary (2000) publizierten Beispieldatensatz zurückgegriffen. Für beide Datensätze liegen Referenzdaten vor.

3.1 Referenzdatensatz DESY

Das vom DESY für Softwarevalidierungen bereitgestellte synthetische Raumnetz besteht aus zwölf Netzknoten, die von zwei Standpunkten aus redundant erfasst wurden. Für dieses Beispieldatensatz liegen die vollständigen polaren Beobachtungstriple und deren a-priori Unsicherheiten vor. Modellstörungen aufgrund inkonsistenter Beobachtungen sind nicht vorhanden.

Tab. 1: Gegenüberstellung der geschätzten Verbesserungsquadratsummen für Strecken, Richtungen, Zenitwinkel und Gesamtausgleichung des DESY-Testdatensatzes.

Applikation	Gesamt	Strecken	Richtungen	Zenitwinkel
DESY	40,33924	16,15776	13,05930	11,12217
JAG3D	40,33918	16,15774	13,05935	11,12209

Eine datumsunabhängige Bewertung ergibt sich durch den direkten Vergleich der Verbesserungsquadratsumme Ω bzw. deren komponentenweiser Aufschlüsselung (Varianz-Komponenten-

¹ <https://software.applied-geodesy.org>

Schätzung). Tab. 1 stellt die Ergebnisse der Verbesserungsquadratsumme aus JAG3D der Referenzlösung gegenüber. Es ist zu erkennen, dass zwischen den Lösungen nur marginale Unterschiede existieren, die auf die geschätzten Parameter keinen Einfluss haben. Dies wird insbesondere deutlich, wenn die geschätzten Koordinaten der Punkte mit der Referenzlösung verglichen werden. Gegenüber der angegebenen Referenzlösung weichen die mit JAG3D ermittelten Koordinaten praktisch nicht voneinander ab, vgl. Tab. 2. Die resultierenden Koordinatendifferenzen sind auf Rechenunschärfen zurückzuführen und besitzen keine praktische Relevanz.

Tab. 2: Referenzlösung der ausgeglichenen Punktkoordinaten für den DESY-Testdatensatz und hierzu ermittelte Abweichungen in JAG3D.

Punktnummer	X _{DESY} [m]	Y _{DESY} [m]	Z _{DESY} [m]	δX [μm]	δY [μm]	δZ [μm]
0000005-SP	4,999991	-0,000022	0,000002	3,6E-05	-5,2E-05	1,5E-04
0000015-SP	15,000025	0,000000	-0,000001	-4,1E-06	-1,1E-04	4,9E-05
0000000-01	-0,000006	-2,000002	-1,999987	2,1E-05	-2,4E-04	2,4E-04
0000000-02	0,000070	-1,999979	2,000032	3,8E-04	-1,7E-04	-4,0E-04
0000000-03	-0,000036	2,000031	-2,000011	4,5E-05	1,1E-04	5,2E-05
0000000-04	-0,000013	1,999964	1,999986	8,2E-05	-1,1E-04	1,4E-04
0000010-01	9,999975	-2,000019	-2,000034	-3,8E-04	1,4E-04	7,4E-05
0000010-02	9,999970	-2,000006	2,000033	-1,5E-04	4,1E-04	2,7E-05
0000010-03	9,999994	2,000015	-2,000040	2,8E-07	1,6E-04	-3,1E-04
0000010-04	10,000019	1,999993	1,999986	-1,6E-05	2,8E-05	-2,4E-07
0000020-01	20,000039	-1,999986	-1,999990	-8,7E-05	-9,1E-05	5,3E-05
0000020-02	19,999975	-1,999982	1,999966	6,7E-06	-1,2E-04	9,3E-05
0000020-03	20,000000	1,999982	-1,999972	-1,0E-05	3,6E-06	-1,0E-05
0000020-04	20,000012	1,999989	2,000030	1,1E-04	-1,2E-04	5,1E-05

Zu ähnlichen Ergebnissen führt auch der direkte Vergleich der geschätzten Lotabweichungen für die beiden Standpunkte 0000005-SP und 0000015-SP. Auch hier existieren praktisch keine Differenzen, wie Tab. 3 zeigt.

Tab. 3: Referenzlösung der ausgeglichenen Lotabweichungen für den DESY-Testdatensatz und hierzu ermittelte Abweichungen in JAG3D.

Punktnummer	ζ _{y,DESY} [mgon]	ζ _{x,DESY} [mgon]	δζ _y [mgon]	δζ _x [mgon]
0000005-SP	-0,0953	0,1705	2,7E-06	-7,6E-07
0000015-SP	0,0135	-0,0980	-1,4E-06	-4,7E-08

Das im Abschnitt 2.1 beschriebene Modell der integrierten hybriden Netzausgleichung sowie die zugehörige Implementierung in JAG3D liefert im Vergleich zur Referenzlösung praktisch identische Werte. Dieses Ergebnis konnte mit weiteren Datensätzen erfolgreich reproduziert werden.

3.2 Validierung der Kongruenzanalyse

Die Validierung des Modells der Kongruenzanalyse erfolgt an einem synthetischen Datensatz, der Caspary (2000, S. 145ff) entnommen ist, und auch in anderen Untersuchungen schon als Referenzdatensatz herangezogen wurde (z.B. Setan und Singh 2001). Es handelt sich um ein Lagenetz, welches aus fünf Objektpunkten (Punkte 10-14) und sieben als stabil angenommenen Referenzpunkten (Punkte 1-4, 6, 7 und 9) besteht. Von allen Referenzpunkten wurden Richtungssätze zu den Objekt- und Referenzpunkten gemessen. Streckenbeobachtungen existieren nur zwischen den Referenzpunkten. Pro Epoche liegen 49 Richtungs- und fünf Streckenbeobachtungen mit a-priori Unsicherheiten vor. Eine Änderung der Netzkonfiguration zwischen den beiden Epochen wurde nicht vorgenommen. Um Deformationen zu simulieren, wurden drei Objektpunkte und ein Referenzpunkt zwischen den Epochen um die in Tab. 4 angegebenen Beträge verschoben und Beobachtungen entsprechend dieser Deformationen simuliert. Modellstörungen aufgrund inkonsistenter Beobachtungen liegen nicht vor.

Tab. 4: Synthetische Verschiebungsvektoren der drei Objektpunkte sowie des einen Referenzpunktes im Deformationsnetz (vgl. Caspary 2000, S. 149).

Punktnummer	Punktart	ΔY [mm]	ΔX [mm]
3	Referenzpunkt	-0,60	-0,50
11	Objektpunkt	-0,75	0,60
12	Objektpunkt	0,50	1,10
13	Objektpunkt	0,30	1,00

Eine Analyse von Objektpunktverschiebungen setzt voraus, dass die Invarianz der Referenzpunkte sichergestellt ist. Entsprechend den Ausführungen in Abschnitt 2.2 erfolgt eine gemeinsame Ausgleichung beider Epochen. Die direkte Prüfung der Referenzpunktstabilität mittels Hypothesentest liefert für die Punkte 3 und 4 signifikante Teststatistiken, wobei eine Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha = 0,1 \%$ gewählt wurde, die einem kritischen Wert von $K_{prio} = 6,9$ entspricht. Identifizierte Deformationen können somit als hoch-signifikant bezeichnet werden.

Tab. 5: Ergebnis der signifikanten Punktverschiebungen in den Referenzpunkten der gemeinsamen Ausgleichung.

Referenzpunkt	∇_Y [mm]	∇_X [mm]	T_{prio}
3	-0,61	-0,43	22,04
4	0,12	0,45	7,96

Während für Punkt 4 die Teststatistik (14) nur leicht über dem kritischen Wert liegt, ist die Überschreitung im Punkt 3 deutlich. In der Annahme, dass nur Punkt 3 verschoben ist und die dargestellten Abweichungen von Punkt 4 lediglich ein Resultat von Verschmierungseffekten in der Ausgleichung sind, wird zunächst nur der Punkt 3 aus der Gruppe der Referenzpunkte ausgeschlossen und epochengetrennt im Modell (16) als Objektpunkt geführt.

Tab. 6: Gegenüberstellung der Ergebnisse der signifikanten Punktverschiebungen in den Objektpunkten.

	Caspary (2000, S. 151)		JAG3D		
Punktnummer	∇_Y [mm]	∇_X [mm]	∇_Y [mm]	∇_X [mm]	T_{prio}
11	-0,83	0,52	-0,83	0,52	11,72
12	0,44	1,56	0,44	1,56	20,30
13	0,34	1,29	0,34	1,30	13,29
3	-0,61	-0,43	-0,61	-0,43	22,04

Die erneute Ausgleichung ohne Berücksichtigung des Punktes 3 als Referenzpunkt liefert keine signifikanten Änderungen mehr in den Referenzpunkten. Die größte Teststatistik findet sich im Punkt 6 und liegt mit $T_{prio} = 3,3$ unterhalb des kritischen Wertes der Fisher-Verteilung. Um diese Verschiebung als signifikant einzustufen, wäre eine Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha > 3,74\%$ nötig. Die Teststatistik ist somit leicht erhöht und der Referenzpunkt 6 sollte in den folgenden Epochen näher analysiert werden.

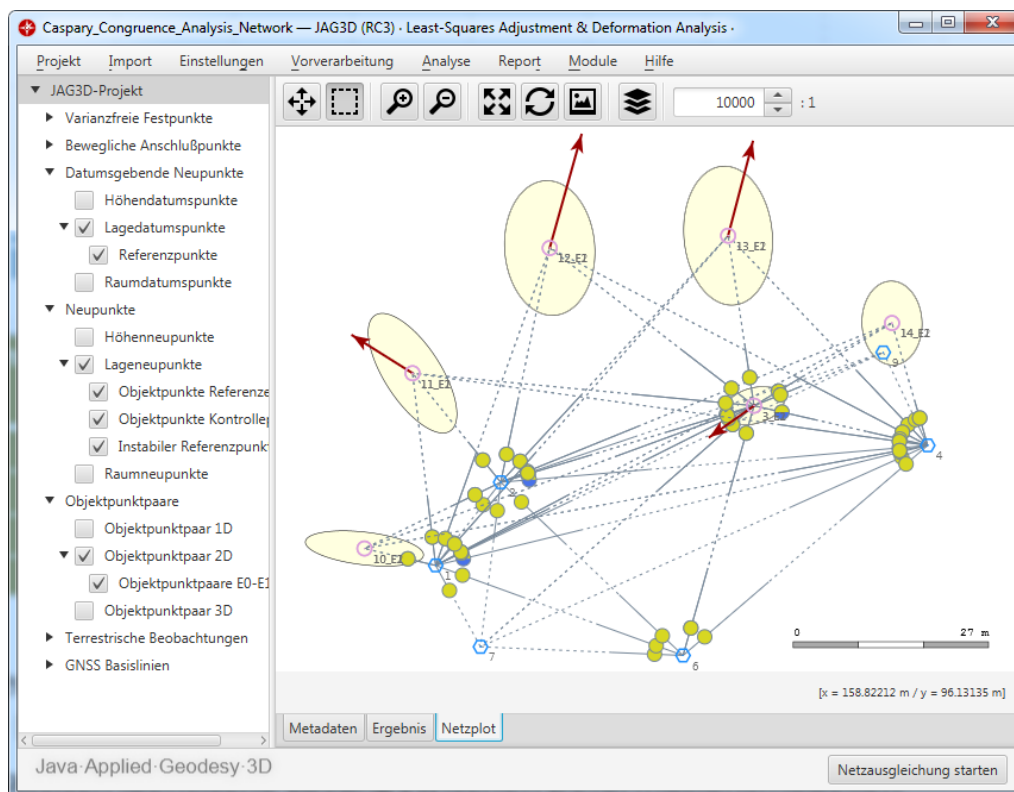


Abb. 3: Netzplot mit Verschiebungsvektoren und zugehörigen Konfidenzbereichen für das synthetische Deformationsnetz in der Ausgleichungssoftware JAG3D.

In Tab. 6 sind die mittels Gl (18) abgeleiteten Objektpunktverschiebungen aufgelistet, deren Nullhypothesen für $\alpha = 0,1\%$ abgelehnt wurden. Neben den Resultaten von JAG3D sind die numerischen Ergebnisse von Caspary (2000, S. 151) zum Vergleich mit angegeben. Eine visuelle Interpretation der identifizierten Deformationen sowie der Netzkonfiguration liefert Abb. 3. Für die Objektpunkte 11, 12 und 13 sowie für den instabilen Referenzpunkt 3 ragen die Verschiebungsvektoren deutlich aus dem zugehörigen Konfidenzbereich heraus.

Bedingt durch das Beobachtungsrauschen werden die synthetischen Verschiebungen aus Tab. 5 nicht exakt zurückbestimmt. Dennoch stimmen Größenordnung und Ausrichtung gut mit den Sollwerten überein. Im direkten Analysevergleich in Tab. 6 sind praktisch keine Unterschiede zu erkennen. Ähnlich gute Übereinstimmungen haben auch Untersuchungen mit anderen Testnetzen und Deformationsmodellen gezeigt (z.B. Sušić et al. 2015; Lehmann und Lösler 2017).

4 Zusammenfassung

Das automatisierte untertägige Monitoring im Schacht Konrad (Salzgitter) erfordert aufgrund von Sichtbeschränkungen u.a. den Einsatz von überkopfhängenden Tachymetern. Hierdurch kann der integrierte Flüssigkeitskompensator, der üblicherweise die Stehachsrestneigung des Instrumentes überwacht und ggf. automatisch korrigiert, nicht zur Horizontierung verwendet werden. Da die Integration von zusätzlichen Sensoren nicht vorgesehen ist, muss die Restneigung des Instruments gegenüber einem globalen Referenzrahmen im Zuge der Netzausgleichung berücksichtigt werden. Während koordinatenbasierte Konzepte aus der industriellen Messtechnik ungeeignet erscheinen, da diese eine Analyse der originären Daten nicht unmittelbar ermöglichen, empfiehlt sich das Modell der integrierten hybriden Netzausgleichung. Hierdurch erfolgt die Ausgleichung auf der Basis der originären Beobachtungen. Das Konzept dieser integrierten Netzausgleichung lässt sich durch die Integration des allgemeinen Data-Snoopings auch für die Analyse von Punktveränderungen im Rahmen einer Kongruenzanalyse erweitern. Sowohl die Analyse der Einzelepochen als auch die Bewertung der Kongruenzanalyse finden somit im selben Modell unter Verwendung derselben, originären Beobachtungen statt. Die Modellbildung der integrierten hybriden Netzausgleichung sowie der beobachtungsbezogene Kongruenzanalyse wurden in diesem Beitrag hergeleitet und deren Eignung anhand von Fallbeispielen aus der Literatur demonstriert.

LITERATURVERZEICHNIS

Baarda, W.: A Testing Procedure for Use in Geodetic Networks. Netherlands Geodetic Commission, 5, 2, Delft, 1968.

Busse, V.; Jarecki, F.: Automatisierte untertägige Verformungsbeobachtung mit Monitoring-Tachymetern. BHM - Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, 162, 10, S. 460-464, 10.1007/s00501-017-0645-0, 2017.

Calkins, J. M.: Quantifying Coordinate Uncertainty Fields in Coupled Spatial Measurement Systems. PhD Thesis, The Virginia Polytechnic Institute and State University, 2002.

Caspary, W.F.: Concepts of Network and Deformation Analysis. In: Rüeger, J.M. (Hrsg.): Monograph 11, School of Surveying, 3. Auflage, The University of New South Wales, Kensington, N.S.W., 2000.

Herrmann, C.; Lösler, M.; Bähr H.: Comparison of SpatialAnalyzer and different adjustment programs. In: Kutterer H.; Seitz F.; Alkhatib H.; Schmidt M. (Hrsg): The 1st International Workshop on the Quality of Geodetic Observation and Monitoring Systems (QuGOMS'11). International

Association of Geodesy Symposia, 140. Springer, Cham, 10.1007/978-3-319-10828-5_12, S. 79-84, 2014.

Jäger, R.; Müller, T.; Saler, H.; Schwäble, R.: Klassische und robuste Ausgleichungsverfahren – Ein Leitfaden für Ausbildung und Praxis von Geodäten und Geoinformatikern. 1. Auflage, Wichmann, Heidelberg, 2005.

Jäger, R.; Gorokhova, L.; Messmer, E.: Modell- und Sensorintegration zum integrierten 3D-Geomonitoring in moderner Datenkommunikationsstruktur mit Anwendung auf den Stuttgarter Fernsehturm. In: Lienhart, W. (Hrsg.): Ingenieurvermessung 17: Beiträge zum 18. Internationalen Ingenieurvermessungskurs Graz, Wichmann Verlag, Berlin/Offenbach, S. 239-252, 2017.

Jarecki, F.; Eschelbach, C.; Lösler, M.; Busse, V.: Tachymetrische Verformungsbeobachtung bei Teufarbeiten: Instrumentierung, Automatisierung und Auswertung. In: 19. Geokinematischer Tag, Schriftenreihe des Instituts für Markscheidewesen und Geodäsie. Technische Universität Bergakademie Freiberg, selbe Ausgabe, 2018.

Lehmann, R.; Lösler, M.: Multiple Outlier Detection: Hypothesis Tests versus Model Selection by Information Criteria. Journal of Surveying Engineering, 142, 4, 10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000189, 2016.

Lehmann, R.; Lösler, M.: Congruence analysis of geodetic networks – hypothesis tests versus model selection by information criteria. Journal of Applied Geodesy, 11, 4, 10.1515/jag-2016-0049, S. 271-283, 2017.

Lösler, M.: Bestimmung des lokalen Verbindungsvektors zwischen IVS- und IGS-Referenzrahmen am Raumobservatorium Onsala (Schweden). avn - Zeitschrift für alle Bereiche der Geodäsie und Geoinformation, 116, 11/12, S. 382-387, 2009.

Lösler, M.; Eschelbach, C.: Konzept zur Realisierung eines Prototypen zur sachgerechten Auswertung von polaren Beobachtungen. avn - Zeitschrift für alle Bereiche der Geodäsie und Geoinformation, 119, 7, S. 249-258, 2012.

Lösler, M.; Arnold, M.; Bähr, H.; Eschelbach, C.; Bahlo, T.; Grewe, R.; Hug, F.; Jürgensen, L.; Winkemann P.; Pietralla, N.: Hochpräzise Erfassung von Strahlführungselementen des Elektronenlinearbeschleunigers S-DALINAC. zfv - Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, 140, 6, 10.12902/zfv-0090-2015, S. 346-356, 2015.

Lösler, M.; Haas, R.; Eschelbach, C.: Terrestrial monitoring of a radio telescope reference point using comprehensive uncertainty budgeting - Investigations during CONT14 at the Onsala Space Observatory. Journal of Geodesy, 90, 5, 10.1007/s00190-016-0887-8, S. 467-486, 2016.

Lösler, M.; Eschelbach, C.; Haas, R.: Kongruenzanalyse auf der Basis originärer Beobachtungen. zfv - Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, 142, 1, 10.12902/zfv-0147-2016, S. 41-52, 2017.

Möser, M.; Knoblach, S.: Entwicklung und Kalibrierung eines kameraunterstützten Hängetachymeters. In: 13. Geokinematischer Tag, Schriftenreihe des Instituts für Markscheidewesen und Geodäsie. Technische Universität Bergakademie Freiberg, 2012-1, Essen: VGE Verlag, S. 139-143, 2012.

Niemeier, W.: Ausgleichungsrechnung – Statistische Auswertemethoden. 2. Auflage, de Gruyter, Berlin, 2008.

Radomi, P.; Schlösser, M.: Adjustment with Least Squares Method, two software packages – two results. In: 11th International Workshop on Accelerator Alignment (IWAA), 13.-17. September 2010, DESY, Hamburg, 2010.

Setan, H.; Singh, R.: Deformation analysis of a geodetic monitoring network. Geomatica, 55, 3, S. 333-346, 2001.

Sušić, Z.; Batilović, M.; Ninkov, T.; Aleksić, I.; Bulatović, V. (2015): Identification of Movements Using Different Geodetic Methods of Deformation Analysis. Geodetski vestnik, 59, 3, 10.15292/geodetski-vestnik.2015.03.537-553, S. 537-553, 2015.