

## **Tachymetrische Verformungsbeobachtung bei Teufarbeiten: Instrumentierung, Automatisierung und Auswertung**

**Focke Jarecki<sup>1</sup>, Volker Busse<sup>1</sup>, Michael Lösler<sup>2</sup>, Cornelia Eschelbach<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH, Peine, Fachbereich Geoinformation

<sup>2</sup> Frankfurt University of Applied Sciences,  
Fachbereich 1: Architektur, Bauingenieurwesen, Geomatik, Labor für Industrielle Messtechnik

### **ZUSAMMENFASSUNG:**

*In diesem Beitrag sollen Konzept und Realisierung der automatischen tachymetrischen Verformungsbeobachtung bei der Schachterweiterung und Füllortauffahrung im Einlagerungsschacht des zukünftigen Endlagers Konrad vorgestellt werden.*

*Bei den Teufarbeiten zur Schachterweiterung herrschen durch den geometrisch abgeschlossenen und räumlich sehr eingeschränkten Bereich besondere Bedingungen. Die zur Begleitung der angewandten Ausbautechnologie notwendige Überwachung des Gebirgsverhaltens kann daher praktikabel nur tachymetrisch und nur von oben erfolgen. Diese Konstellation erfordert die ungewöhnliche Überkopf-Montage mehrerer Monitoring-Tachymeter, was wiederum angepasste Auswertelgorithmen im Netzausgleichungsschritt erfordert. Insbesondere muss wegen der äußeren Bedingungen ein weitgehend automatisierter Ablauf von der regelmäßigen Messwerterfassung über die Netzausgleichung bis zur Deformationsanalyse zur zuverlässigen Detektion von Punktbewegungen implementiert werden.*

### **ABSTRACT:**

*At the former iron ore mine Konrad (Salzgitter), which recently is being converted into a repository for nuclear waste with negligible heat generation, the repositioning shaft is expanded and a large filling site is developed currently. In this context an automated tachymetric deformation monitoring system is applied. The concept and realization of this system are presented here. The shaft expansion poses some special challenges, since working space is geometrically closed and spatially very restricted. Tachymetric monitoring can therefore only take place from above. Thus, an innovative overhead mounting of monitoring tachymeters is required. This overhead application results in the necessity of an adapted evaluation and geodetic net adjustment. In addition, the instrument setup makes direct access for installation and maintenance more difficult. Therefore, redundancies were*

created, and are taken into account in the evaluation process consequently in order to obtain consistent results.

## 1 Einführung

Das frühere Eisenerzbergwerk Konrad in Salzgitter wird derzeit zu einem Endlager für radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung umgebaut. Die einzulagernden Abfallgebinde sollen über den Schacht Konrad 2 in das Grubengebäude eingefördert werden. Im Füllort werden die Gebinde zum Transport in die Einlagerungskammern umgeladen. Hierfür ist das bestehende Füllort wesentlich zu vergrößern und neu auszurüsten.

Das mit einem Auffahrdurchmesser von ca. 13 m bei –763 m NHN bzw. 853 m Teufe zu erweiternde Füllort erstreckt sich auf eine Länge von ca. 70 m. Der lichte Mindestdurchmesser nach Fertigstellung des endgültigen Ausbaus beträgt 10 m (vgl. Abb. 1).

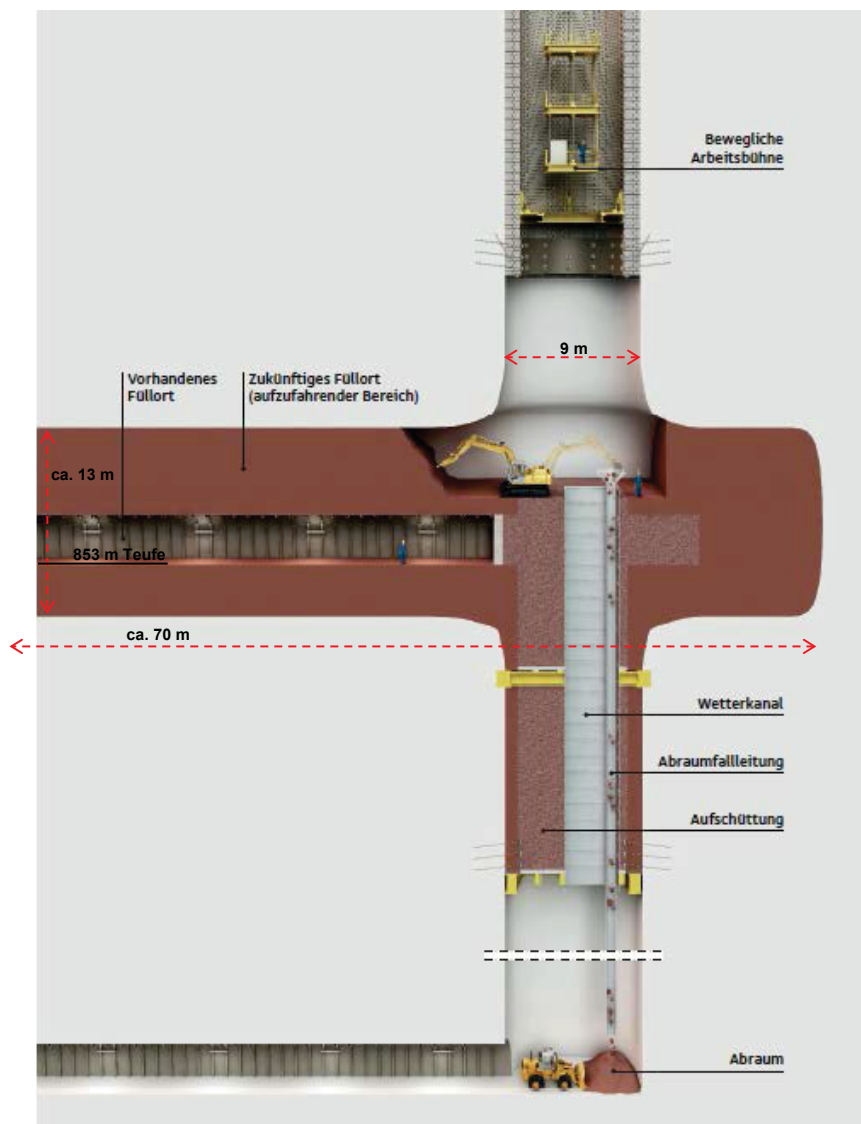


Abb. 1: Schachterweiterung und Füllortauffahrung

Die Auffahrung des Füllorts erfolgt in Anlehnung an die Neue Österreichische Tunnelbauweise (NÖT) nacheinander in Kalotte, Strosse und Sohle. Der Ausbau des Füllorts ist mit einer nachgiebigen äußeren, bewehrten Spritzbetonschale inklusive Systemankerung (Gleitanker) als Sicherung vorgesehen. Nach dem Abklingen der wesentlichen Konvergenzen wird der endgültige Ausbau als quasistarre innere Spritzbetonschale ausgeführt.

Zur Schachtdurchdringung des Füllorts wird im Schacht, der einen Durchmesser von 7 m besitzt, eine ca. 15 m hohe Schachtglocke hergestellt, die ebenfalls zunächst eine nachgiebige Sicherung aus bewehrtem Spritzbeton mit Systemankerung und später die endgültige Ausbausohle in Spritzbeton erhält.

Im Bauablauf wird zunächst im Abteufbetrieb die Erweiterung des Schachtes durchgeführt.

## 2 Baubegleitende Überwachungsmessungen

Für die baubegleitenden Überwachungsmessungen nach der Beobachtungsmethode wurde ein Messkonzept bestehend aus einer Kombination von frühzeitig installierbaren Konvergenzmessquerschnitten bzw. -horizonten und nachfolgend zu installierenden Extensometern entworfen. Die Konvergenzmesspunkte dienen gleichzeitig der Lage- und Höhenbestimmung (3D-Überwachung).

Das Messziel für die Konvergenz- und 3D-Überwachung in der Bauphase ist die Bestimmung der erwarteten Konvergenzen in der Größenordnung von 50 cm und mehr bzw. deren Abklingen mit Genauigkeitsforderungen im cm-Bereich. So wird das Ende der Konvergenzphase erkennbar. Im Sinne der Beobachtungsmethode definiert diese Information den Zeitpunkt zum Einbringen der endgültigen Ausbau-Innenschale. Außerdem dienen die laufend gemessenen Bewegungen zur Kalibrierung des gebirgsmechanischen Modells und so zur Dimensionierung des weiteren Ausbaus. Bei unerwarteten Bewegungen können zudem bergbauliche Gegenmaßnahmen ergriffen werden.

Im Tunnelbau ist die Beobachtung der Ausbauverformung und der Gebirgskonvergenz mittels fest installierter Tachymeter ein operationell eingesetztes Verfahren. Gegenüber der im Bergbau mobil eingesetzten Konvergenzmessung mit Stahlmessbändern und kombinierten Messuhr-Spannsystemen hat die tachymetrische Messung den Vorteil, zur Messung selbst den Messquerschnitt nicht zu blockieren. Die Konvergenzmesspunkte müssen lediglich zur Vermarkung und Signalisierung zugänglich sein. Darüber hinaus erfolgt die eigentliche Messung schneller, Datenfluss und Ansteuerung sind grundsätzlich automatisierbar. Als Nachteile schlagen eine deutlich anspruchsvollere Technologie mit entsprechend höheren Investitionen und eine höhere Anfälligkeit gegenüber Umweltbedingungen zu Buche.

Die Konvergenzhorizonte im Schacht sind während der Bauzeit für Messungen nicht zugänglich. Daher muss ein optisches Messsystem verwendet werden. Die Tachymetrie bietet zudem in Grenzen die Möglichkeit, mit den Instrumenten aus dem beengten eigentlichen Baufeld auszuweichen, wenn sie ferngesteuert oder selbsttätig messen.

Entsprechende längerfristige Installationen müssen gegen Baustellen- und Umwelteinflüsse geschützt vorgenommen werden. Im Gegensatz zur klassischen Konvergenzmessung ist die zusätzlich geforderte Bestimmung dreidimensionaler Punktverschiebungen mit tachymetrischen Messungen direkt möglich, erfordert aber die Anbindung an ein übergeordnetes Referenzsystem.

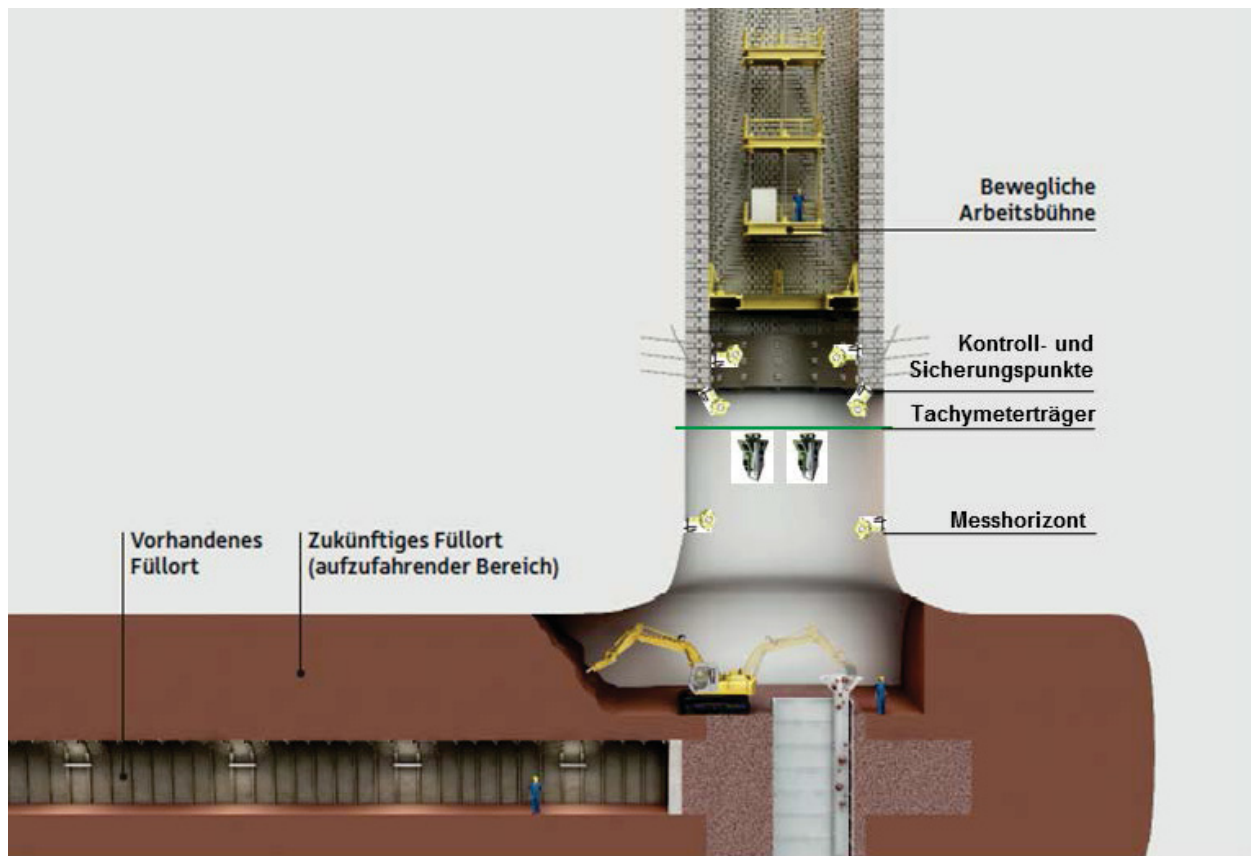


Abb. 2: Prinzip des Überwachungskonzepts

### 3 Anwendung des Messkonzepts bei Teufarbeiten

#### 3.1 Instrumentierung

Der dargestellte Bauablauf erfordert den von einem Tachymeterhorizont aus messbaren Überwachungsbereich von oben abzudecken (siehe Abb. 2). Die Anbindung an das übergeordnete Referenzsystem wird durch oberhalb des Tachymeterhorizonts im Vorfeld bestimmte, speziell vermarkte, sowie geschützte Kontroll- und Sicherungspunkte realisiert, da der Baubereich über längere Zeiträume messtechnisch vom umliegenden Grubengebäude und den dortigen Referenznetzen abgeschnitten ist.

In dieser Konstellation stört die Installation der Überwachungstechnik die Bautätigkeit im beengten Schacht möglichst wenig, umgekehrt sind so die geringsten Einflüsse des Baugeschehens auf die Überwachungsmessungen zu erwarten, da insbesondere die Sichten den jeweils aktuellen Baubereich nicht oder wenig betreffen. Aus konstruktiven Gründen (großer Abschattungsbereich am Tachymeterfuß) ist für diese Konstellation allerdings die ungewöhnliche Anordnung der Instrumente über Kopf notwendig.

Diese Überkopfanwendung hat zur Folge, dass der Stehachskompensator des Instruments nicht arbeitet und damit keine instrumentenseitige Orientierung des Instrumentensystems an der Lotrichtung sichergestellt ist. Daher muss eine stabile manuelle Horizontierung angestrebt werden. Unzulänglichkeiten in der Realisierung der Horizontierung haben Konsequenzen bei der Auswertung.

Um damit umzugehen, müssen die Auswertelgorithmen lokale 3D-Messungen verarbeiten können. Auf die Auswertung wird im Kapitel 3.3 und ausführlicher im Beitrag Lösler et al. (2018) in diesem Band näher eingegangen.

Konstruktiv lässt sich die Überkopfinstallation lösen, entsprechende Vorversuche und Untersuchungen verliefen erfolgreich. Allerdings liegen für eine solche Konstellation im Dauerbetrieb unter Baustellenbedingungen keine Erfahrungen vor. Insofern muss die Tachymeterinstallation redundant ausgelegt werden, um zufällige Ausfälle kurzfristig abzufedern. Außerdem muss eine Befahrungsmöglichkeit zur Wartung oder Reparatur der Instrumente vorgesehen werden, auch wenn die Anlage prinzipiell selbsttätig läuft.

Die Tachymeterinstallation im oberen Teil des Überwachungsbereichs ist von der jeweiligen Bau- sohle mit fortlaufendem Baufortschritt nicht mehr erreichbar. Die geforderte Befahrungsmöglichkeit hat die Konsequenz, dass die Installationspunkte so vorgesehen werden müssen, dass sie vom Fördergestell durch entsprechende Handlöcher oder Öffnungen aus erreichbar sind. Gemäß den einschlägigen Technischen Anforderungen an Schacht- und Schrägförderanlagen TAS (LBEG, 2005) ist ein Mindestabstand von 25 cm zum Fahrtrum einzuhalten (siehe Abb. 3, rechts).



Abb. 3: links: Tachymeter in Aufhängevorrichtung, rechts: Einbausituation am Tachymeterträger-Kragarm mit Schutzhaube und Fahrkorb

Weiterhin ist für die zukünftigen Rückarbeiten sicherzustellen, dass der Installationsbereich mit der Schachtarbeitsbühne befahrbar bleibt. Die eigentliche Verlagerung mit Querträgern in den Schachtwänden kann daher nur in den entsprechenden Achsen erfolgen. Um in den für die Tachymeterinstallation notwendigen Bereich zu gelangen, sind für die beiden Tachymeter an diesem Querträger abklappbare Kragarme angebracht (Tachymeterträger, siehe Abb. 4). An ihrem äußeren

Ende tragen die Kragarme eine Grundplatte, an der die Aufhängeeinrichtung für die Tachymeter verschraubt werden kann.



Abb. 4: Tachymeterträger im Schacht mit Kragarmen und Befahrungseinrichtung

Zum Schutz vor Baustellen- und Umwelteinflüssen ist eine Überdruck-Schutzhaube vorgesehen (siehe Abb. 3, rechts), die über einen permanenten Druckluftanschluss versorgt wird.

Die Aufhängevorrichtung für Tachymeter und Schutzhaube besteht aus einer doppelten, mittels drei Bolzenverbindungen und den entsprechenden Kontermuttern grob horizontierbaren Platte. Nach unten trägt diese einen zylindrischen Aufsatz zur Aufnahme des Wild-Klauenfußes des Tachymeters, der durch Stifte oder Bolzen in radialen Bohrungen von außen gehalten wird. Auf der Oberseite sind rechtwinklig zueinander zwei Röhrenlibellen zur Horizontierung angebracht (siehe Abb. 3, links).

Zwischen Doppelplatte und Aufsatz wird die Bodenplatte der Tachymeterschutzhaube gehalten, die über ein Bolzensystem die eigentliche Tachymeterschutzhaube trägt.

Über den Tachymeterträger werden das serielle Strom- und Datenversorgungskabel (Niederspannung, RS-232) und eine flexible Druckluftleitung geführt. Das mehradrige Versorgungskabel führt durch eine Kabeldurchführung in der Schutzhauben-Grundplatte und ist am Tachymeterfuß angeschlossen. Es verbindet jedes Instrument mit einem Tachymeteranschlusskasten, der über schachtgängige Signal-/Niederspannungskabel (24V, RS-232) an einen Steuerungskasten angeschlossen ist. Dieser stellt sowohl die Verbindung mit der 220 V-Spannungsversorgung als auch über Lichtwellenleiter (LWL) den Anschluss an das untertägige Geotechnik-LAN und das betriebliche Rechner-

netzwerk her. Die Tachymeteranschlusskästen haben Ausmaße von ca. 15 cm x 15 cm x 10 cm, die Steuereinheit ist in einem Standardschaltschrank, ca. 60 cm x 60 cm x 40 cm, untergebracht.

Die Überkopfanwendung elektronischer Robot-Tachymeter ist zuletzt wiederholt vorgeschlagen worden (Knoblach & Möser, 2007; Möser & Knoblach, 2012). Die entsprechenden Entwicklungen heben auf Messungen in geometrisch außergewöhnlichen Situationen ab. Im Messprozess selbst wird die Stehachsneigung durch unmittelbar am Instrument ergänzte Sensorik berücksichtigt. So wird der Stehachskompensator des Instruments ersetzt. Als geeignete Tachymeter wurden dabei insbesondere Instrumente der Serien Leica TC2000 und TPS1100 benannt.

Im Laserscanning und bei der Anwendung von Lasertrackern sind nicht an der Lotrichtung orientierte Aufstellungen eine übliche Anwendung (z. B. Juretzko, 2010). Allerdings konnte für scannende Tachymeter kein angefragter Instrumentenhersteller einen aktuellen Tachymetertyp benennen, der für eine Überkopfanwendung konstruktiv geeignet wäre. Daher wurde hier auf die Serie Leica TPS1100 zurückgegriffen.

Um die Einhaltung der geforderten Genauigkeiten nachzuweisen und die grundlegende Handhabung der Instrumente in hängender Position prototypisch aufzuzeigen, wurde am Geodätischen Institut Hannover eine entsprechende Studie durchgeführt (Neumann et al., 2015). Dabei wurde die grundsätzliche Eignung des Instrumentariums zur Bestimmung von 3D-Koordinaten in örtlichen Systemen im geforderten Genauigkeitsbereich nachgewiesen.

Die Neigung der Aufhängung, also etwaige Unterschiede in der Stehachsneigung, wurden in diesem Versuchsaufbau nur zu Kontrollzwecken parallel erfasst. Auswertung und Koordinatenberechnung erfolgten in lokalen Systemen, die über identische Punkte mit einer 3D-Helmert-Transformationen ineinander überführt werden konnten. Außer einer aus mechanischen Gründen angebrachten groben Horizontierung sind (bei Vorliegen der entsprechenden Verknüpfungspunkte) also keine Anforderungen an die Lotrechtstellung der Stehachse zur Realisierung eines gemeinsamen Systems zu stellen, wenn der Auswertalgorithmus die Berücksichtigung der entsprechenden, vom tachymetrischen "Normalfall" abweichenden Orientierungen zulässt.

### **3.2     *Automatisierung***

Die Tachymeter werden über Steuerungs- und Anschlusskästen angebunden. Der Anschluss der Instrumente selbst erfolgt durch jeweils einen Anschlusskasten über serielle Verbindungskabel, die auch die Stromversorgung übernehmen. Pro Messbereich laufen die Verbindungen in einem Steuerungskasten zusammen. Neben dem Netzstromanschluss wird dieser über eine unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) abgepuffert, die auch die Instrumente versorgt. Die Elektronik in den Steuerungskästen wickelt das Messprogramm ab und bereitet die von den Instrumenten kommenden Messwerte zur Weiterleitung an die eigentliche geodätische und weitere Auswertung vor. Dazu werden die Messwerte zunächst in einer lokalen Datenbank gehalten. Damit wird die Durchführung der Messungen vom Netzzugriff auf die Steuerungskästen entkoppelt.

Die Steuerungskästen werden über Lichtwellenleiterkabel angeschlossen, die über Sammler die Verbindung ins betriebliche Rechnernetzwerk herstellen. Die Tachymetersteuerung stellt Administrations- und Wartungsfrontends zur Verfügung und kann über TCP/IP angesprochen werden. Die Steuerung der einzelnen Tachymeter selbst erfolgt über die GeoCOM-Schnittstelle, das Messpro-

gramm und die beteiligten Punkte werden über eine Web-Oberfläche direkt auf der Steuereinheit konfiguriert. Der Zugriff kann also netzgebunden aus dem BGE-Intranet oder durch Herstellung einer direkten Netzverbindung vor Ort erfolgen. Außer für rechnerseitige Wartungsarbeiten ist kein Zugriff auf den Steuerungsrechner selbst notwendig. Das dargelegte Automatisierungsschema ist in Abbildung 5 dargestellt.

Vom epochenorientiert getakteten Messprogramm werden in Interaktion mit der lokalen Datenbank die Messwerte einer Epoche abschließend aufbereitet und zur Weiterverarbeitung zusammengefasst auf einen (übertägigen) Datensammelrechner weitergegeben. Auf diesem Datensammelrechner erfolgen wiederum Ablage- und Umformatierungsschritte. Für einen Epochenausgleich liegen so Satzmittel für die beteiligten Instrumente und Zielpunkte einer Epoche vor. Dieser freie Einzelepochenausgleich kann automatisch angestoßen werden und liefert einerseits Koordinaten im gegebenen System der Datumpunkte. Andererseits werden nach der Grobfehlersuche dieses ersten Berechnungsdurchlaufs um mögliche Modellstörungen bereinigte Beobachtungen als Eingabewerte für eine Deformationsanalyse mittels Zweiepochenvergleich bereitgestellt.

Herkömmliche ingenieurgeodätische Monitoringlösungen liefern als Ergebnis im Wesentlichen Schwellwertvergleiche auf Messwertebene. Wegen der zwingend redundanten Auslegung und der Vielzahl auflaufender Daten wurde hier ein System entwickelt, das die Messungen im Sinne einer Netzausgleichung integriert auswertet. Damit können fundierte, stochastisch belegbare und automatisiert analysierbare Aussagen zu Verformungen geliefert und mit Prognosewerten in übergeordneten Systemen verglichen werden.

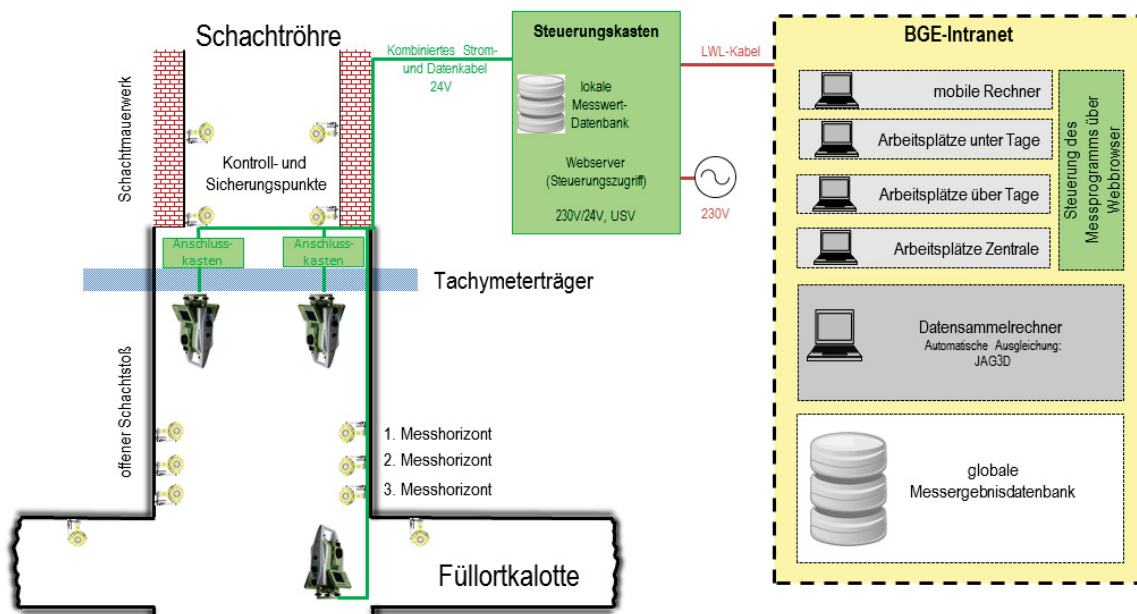


Abb. 5: Automatisierungsschema

### 3.3 Auswertung

Die bei BGE verwendete globale Messergebnisdatenbank stellt für Punktbewegungsmessungen Koordinatendifferenzen zu einer Nullepoche dar. Darüber hinaus kann sie Genauigkeitsmaße verwalten und so individuelle Signifikanzniveaus berechnen.



Zur automatisierten Übertragung der in Netzkonfigurationen gewonnenen Messdaten in dieses System ist somit für jeden Epochenvergleich eine Deformationsanalyseausgleichung mit den bekannten Voraussetzungen (Pelzer, 1985) durchzuführen, bei der die angesetzten Modelle geprüft, die Identität des Datums (und der Datumspunkte) für beide Epochen nachgewiesen und die entsprechenden Ergebnisse berechnet werden. Da wegen der sukzessiven Erweiterung des Überwachungsbereichs objektpunktabhängig individuelle Nullepochen in Frage kommen, ergeben sich auch bei dieser vergleichsweise einfachen kinematischen Auswertemethodik eine Vielzahl von Epochenvergleichen, für die jeweils wiederum die Identität des Datums sichergestellt werden muss. Dieser Verwaltungsprozess wird, ebenso wie die Ansteuerung des Ausgleichsprogramms, hier automatisiert durchgeführt. Unvermeidliche Datumsänderungen werden hinsichtlich ihrer Auswirkungen analysiert und bei der Darstellung der Ergebnisse in der Messergebnisdatenbank berücksichtigt.

Zur Realisierung dieser Automatisierung bot sich das freie Ausgleichspaket JAG3D (Lösler 2018) an. Im Gegensatz zu kommerzieller Software konnte die Ansteuerung des Rechenkerns und damit die Einbindung in die automatisierte Auswertekette hier auf Programmiererebene umgesetzt werden. Dazu wurde die Schätzung der Stehachsorientierung in das angesetzte funktionale Ausgleichsmodell aufgenommen und somit die in den vorhergehenden Abschnitten geforderten Voraussetzungen für die direkte Anwendung des beobachtungsbasierten Ansatzes der "integrierten Netzausgleichung" von JAG3D für die Überkopftachymetrie geschaffen. Wie in Lösler et al. (2018) in diesem Band ausführlicher geschildert, erlaubt dieser Ansatz im Gegensatz zu koordinatenbasierten Herangehensweisen z.B. über fortgesetzte 3D-Helmerttransformationen eine direkte Analyse der originären Beobachtungen und ermöglicht damit beispielsweise die direkte Identifikation von Modellstörungen in konkreten, einzelnen Polarelementen.

Für einzelne Epochenvergleiche stellt der in diesem Programm gewählte Ansatz des Gauß-Markov-Modells (GMM) außerdem die Identität des Datums sicher, indem auch die Zweiepochenausgleichung auf Basis der Beobachtungen erfolgt. Wie beschrieben, muss allerdings beim Vergleich mehrerer Epochendifferenzen weiterhin auf Datumsidentität geachtet werden.

Die Ergebnisse der automatisiert angesteuerten Epochenvergleiche fließen inklusive der zugehörigen Genauigkeitsinformation in eine globale Ergebnisdatenbank, in der auch die Plausibilitätskontrolle in einem zweistufigen Freigabeschema abgebildet wird. Außerdem können unterschiedliche Visualisierungen und weitergehende Auswertungen, genannt sei hier die Gegenüberstellung mit Prognosewerten abhängig vom Bauzustand, direkt aus dieser Software generiert werden. Ebenso sind Datenauspielungen zur Berichtserstellung möglich.

## **4 Realisierung und Ergebnisse**

Die Installationen der Instrumente für einen ersten Überwachungsbereich wurden zum Jahreswechsel 2016/17 erfolgreich durchgeführt. Im Rahmen der ersten Phase der Schachterweiterungsarbeiten in der oberen Schachtglocke bis zum Eintritt in den Bereich des eigentlichen Füllorts wurden baubegleitend vier Messhorizonte realisiert, eingemessen und dem Messprogramm für die automatisierte Überwachung hinzugefügt. Einer dieser Horizonte wird durch die Köpfe von bis zu 30 m tief im Gebirge eingebrachten Extensometern gebildet, für deren Ankerpunkte über die tachymetrische Überwachung bezogen auf den Überwachungsbereich absolute Punktverschiebungen berechnet

werden können. Im Zuge der weiteren Teufarbeiten wurde der Überwachungsbereich auch um die Kalotte für Füll- und Blindort erweitert. Hier wurden vertikale Messquerschnitte zur Konvergenzbestimmung und zum geometrischen Anschluss von Extensometern eingerichtet. Für diese Erweiterung sind zusätzliche, herkömmlich auf Konsolen aufgebaute Tachymeterstandpunkte in die automatisierte Überwachung und den Auswertungsprozess eingeführt worden.

Seit Februar 2017 werden die Messungen automatisiert durchgeführt. Durch ein drei- bis sechsständiges Messintervall mit Messungen in jeweils zwei Vollsätzen, für die die Instrumente etwa eine halbe Stunde benötigen, wird auch über Einzelausfälle und Fehlmessungen durch Verdeckungen und andere Umwelteinflüsse hinweg die angestrebte tägliche Erfassung der Punktkoordinaten sichergestellt.

Die Eingewöhnung in die hier beschriebene Messanlage und die allgemeine Handhabbarkeit der installierten Hard- und Software ist auf Grund des guten Ausbildungsstands und des großen Engagements der Mitarbeiter vor Ort weitgehend reibungslos verlaufen. Hier konnte insbesondere wegen einer flexibel geplanten DV-Zugangsstruktur mit dem vor Ort laufenden Webserver für die Anlagensteuerung situationsabhängig jeweils schnell gehandelt und reagiert werden.

Die bisherigen Ergebnisse bestätigen die angesetzten Genauigkeiten, beispielhaft dargestellt in Abbildung 6.

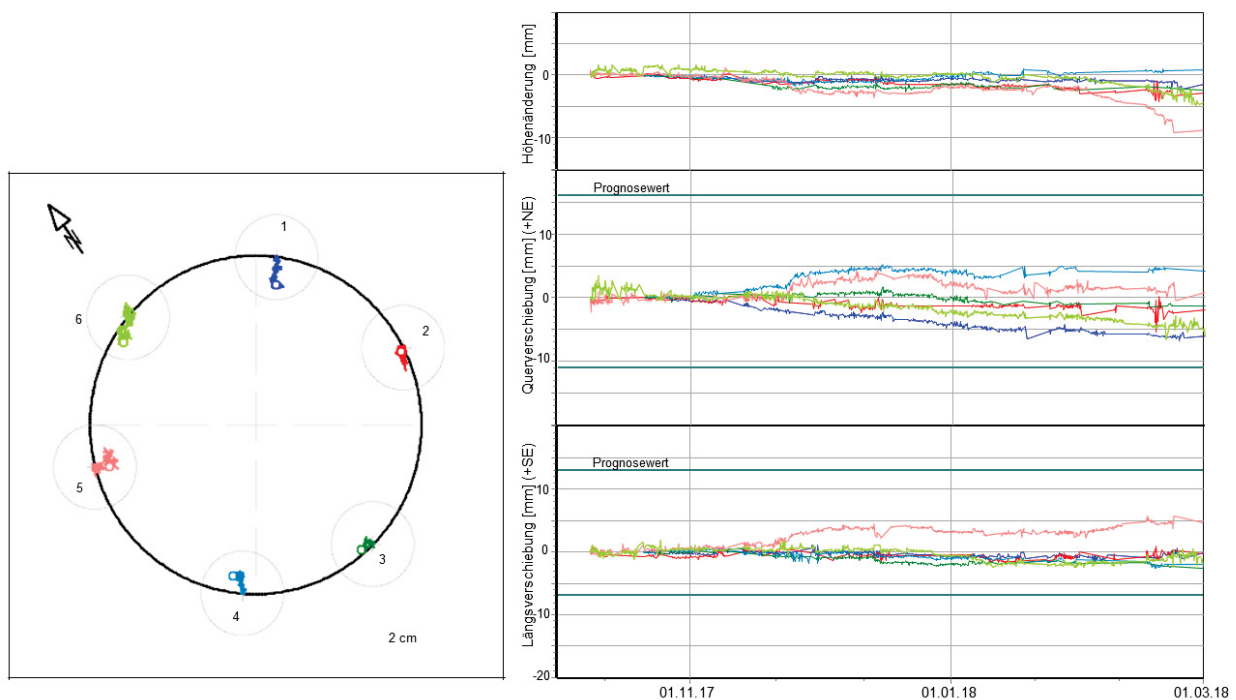


Abb. 6: Lageverschiebungsvektoren und Verschiebungskomponenten mit Prognosewerten für die Punkte eines Messhorizonts im Schacht über 5 Monate unter Konvergenzeinfluss

Die angestrebte Ergebnisrate von einer täglichen Bestimmung der Punktkoordinaten wird ebenfalls erreicht. Die zu Beginn der Auffahrung relativ niedrigen prognostizierten absoluten Bewegungswerte (im mm-Bereich) können allerdings auf Grund der angesetzten Genauigkeiten nicht signifikant aufgelöst werden. Für Punkte im Bereich der Füllortauffahrung können aber signifikante Epochenunterschiede und klare Bewegungstrends bestimmt und mit den aus den Prognoserechnungen

abgeleiteten Warn- und Schwellwerten verglichen werden. Eine weitere Vergleichsmöglichkeit bieten die Abschnittsverschiebungen der genannten Extensometer, an denen sich viele geomechanische Effekte in vergleichbarer Art und Weise auswirken.

## LITERATURVERZEICHNIS

Knoblach, St.; Möser, M.: Messungen mit einem Tachymeter in hängender Position. In: 8. Geokinematicher Tag, S. 77–85. Essen: VGE Verlag, 2007 (Schriftenreihe des Instituts für Markscheidewesen und Geodäsie, Technische Universität Bergakademie Freiberg, Heft 2007-2).

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

Lösler, M.: Java Applied Geodesy 3D, <https://software.applied-geodesy.org/de/> (26.3.2018)

Lösler, M.; Eschelbach, C.; Jarecki, F.: Auswerte- und Analysestrategie für untertägige Überwachungsmessungen. In: 19. Geokinematicher Tag, Schriftenreihe des Instituts für Markscheidewesen und Geodäsie. Technische Universität Bergakademie Freiberg, selbe Ausgabe, 2018.

Juretzko, M.: Hochpräzise Vermessung ringförmiger Befestigungsschienen in der Neutrinowaage KATRIN. In: Wunderlich, Th. (Hrsg.): Ingenieurvermessung 2010, Beiträge zum 16. Internationalen Ingenieurvermessungskurs München, 2010, S. 357–368. Berlin: Wichmann, 2010.

Neumann, I.; Paffenholz, J.-A.; Wodniok, J.: Entwurf und Durchführung einer Untersuchung des Tachymeters Leica TCRA1102 im Überkopfeinsatz. Unveröffentlichter Bericht, Geodätisches Institut der Leibniz Universität Hannover. Hannover: GIH, 2015.

Pelzer, H.: Geodätische Netze in Landes- und Ingenieurvermessung II. Stuttgart: Wittwer, 1985.

LBEG: Technische Anforderungen an Schacht- und Schrägförderanlagen (TAS), Stand: Dezember 2005.