

Anwendung Wissensbasierter Techniken zur Analyse von Verschiebungen im Tunnelbau

Dipl.-Ing. Dr. Klaus Chmelina, Geodata ZT GmbH Wien

Zusammenfassung: Im Beitrag werden drei Beispiele einer automatischen, wissensbasierten Analyse von während des Tunnelbaus geodätisch beobachteter Verschiebungen vorgestellt. Die Analysen dienen der Unterstützung einer Teilaufgabe der geotechnischen Interpretation, konkret, dem Erkennen spezieller *Auffälligkeiten* in den Verschiebungsdaten. Diese werden unter Nutzung weiteren Fachwissens entdeckt, welches in Form von Fakten und empirischen Regeln repräsentiert ist. Ein vorwärtsverkettender Inferenzmechanismus steuert die Anwendung dieses teils unsicheren Fachwissens. Die Entwicklung wird vom österreichischen Forschungsförderungs fonds für die Gewerbliche Wirtschaft (FFF) unterstützt.

1 Einleitung

Seit nunmehr vier Jahrzehnten werden Konvergenz- und andere Messungen im Tunnelbau nach der NÖT (**N**eue **Ö**sterreichische **T**unnelbaumethode) systematisch durchgeführt. Unter diesen haben heute aufgrund der hohen Aussagekraft der Ergebnisse speziell die Optischen 3D Verschiebungsmessungen mit Tachymetern eine herausragende Stellung erlangt. Die periodischen, den Vortrieb begleitenden Messungen zu regelmäßig angeordneten, in der Tunnelwand festvermarkten Prismen sind mittlerweile nicht mehr weg zu denkende Bestandteile der NÖT selbst geworden. Ihre Interpretationen liefern wesentliche Entscheidungsgrundlagen zur erfolgreichen Steuerung des laufenden Bauprojekts.

In den letzten Jahren konnten Entwicklungen im Vermessungswesen und in der Datenverarbeitung den Mess- und Auswerteprozess weitgehend automatisieren und beschleunigen. In der Folge stiegen im Tunnelbau die periodisch (täglich) zu interpretierenden Datenmengen erheblich an. Es wird häufiger (bis hin zur Online-Datenerfassung) und auch räumlich dichter gemessen. Gleichzeitig stieg das Wissen in Zusammenhang mit der Interpretation der Messergebnisse, d.h., es kann immer mehr aus den Verschiebungen *herausgelesen* werden (SCHUBERT, W., et al., [2002]). Da die Interpretation von Messergebnissen jedoch nach wie vor ausschließlich menschlichen Experten vorbehalten ist,

können sich heute je nach Größe und Fortschritt eines Bauprojekts bestimmte Schwierigkeiten ergeben:

- Aufwand und Zeitbedarf für eine kompetente Interpretation steigen kontinuierlich,
- Interpretationsergebnisse liegen nicht mehr *zeitnah* vor, wichtige Entscheidungen oder Reaktionen erfolgen mitunter verzögert,
- eine *zeitnahe* Interpretation kontinuierlicher Messungen (Stichwort: Online-Messsysteme) ist organisatorisch nicht möglich,
- die Anforderungen an die fachliche Kompetenz des Interpretierenden steigen, d.h., er sollte stets über den aktuellen Wissensstand verfügen (nicht nur in seinem Fachbereich).

Von diesen Schwierigkeiten motiviert, wird seit Feb. 2003 im Rahmen eines FFF-Projekts an der Entwicklung eines Prototyps eines wissensbasierten Systems gearbeitet, der eine Teilaufgabe (Vorstufe) der geotechnischen Interpretation, konkret, das rasche Erkennen sogenannter *Auffälligkeiten* unterstützen soll. Eingangsdaten des Systems bilden bis dato geodätisch erfasste Verschiebungen, Baufortschrittsdaten sowie vorab zu deklarierendes Interpretationswissen. Letzteres muss vom fachkompetenten Nutzer eingegeben werden, d.h., das System enthält dieses nicht a priori sondern bietet Dialoge zu dessen Eingabe und Begründung. Hernach übernehmen heuristische Regeln dessen automatische Anwendung. Aufgrund dieser Eigenschaft ist das System auch für vom Tunnelbau verschiedene Anwendungsbereiche prinzipiell geeignet. Anhand dreier Interpretationsbeispiele wird seine Arbeitsweise nunmehr erläutert.

2 Beispiel 1: Erkennen einer auffälligen Verschiebungsgeschwindigkeitszunahme unter Berücksichtigung des Baufortschritts

Ein wesentliche Aufgabe bei der Beurteilung auftretender Verschiebungen ist die Überwachung ihres Stabilisierungsverhaltens, d.h., die Art und Weise des Abklingens der Verschiebungszuwächse mit der Zeit. Im Allgemeinen wird ein solches Abklingen als *Normalverhalten* vorausgesetzt. Treten jedoch Abweichungen von diesem, wie z.B. neuerliche Beschleunigungen, auf, so sind deren Ursachen zu suchen. Diese können z.B. in einer kürzlich erfolgten Erhöhung der Vortriebsgeschwindigkeit und/oder auch im Herannahen einer nachfolgenden Bauphase wie z.B. der Strosse liegen. Kommen diese oder auch andere Ursachen jedoch nicht in Betracht, ist die Situation als *auffällig*, mitunter gar kritisch einzustufen. Ein Versagen des Gebirges und/oder der Tunnelauskleidung könnte sich anbahnen. Das derart formulierte Wissen kann, obzwar wenig genau, so doch im Fachgebiet als allgemein gültig angesehen werden.

Seine Repräsentation und Anwendung im System wurde in Form von Fakten und Regeln in vereinfachter Darstellung wie folgt realisiert:

Eingangsfakten: Verschiebungsdaten, Baufortschrittsdaten

Regel 1:

Wenn	in Verschiebungen das Muster <i>Geschwindigkeitszunahme</i> auftritt,
Dann	erzeuge einen Fakt Xi, der die Situation beschreibt (die entsprechenden Daten markiert).

Die Vorbedingung (WENN) von Regel 1 beinhaltet die Repräsentation eines abstrakten Musters *Geschwindigkeitszunahme*, welches im einfachsten Fall aus den Verschiebungsgeschwindigkeiten dreier aufeinanderfolgender Messepochen i, i+1 und i+2 aufgebaut werden kann. Es gelte dabei die einfache Bedingung, dass die Verschiebungsgeschwindigkeit zwischen den Messepochen i+1 und i+2 größer sei als jene zwischen i und i+1. Ein solches Muster kann natürlich auch komplexerer Bauart sein (Berücksichtigung mehrerer Epochen, der Messgenauigkeit, etc.). Bei Ausführung der Regel (DANN) wird dieses Muster nun gegen die Wissensbasis gematcht und eine Erweiterung des Wissens insofern erwirkt, als dem System jedes erfolgreiche Matching explizit als Fakt Xi bekannt gemacht wird. Nun wird die Inferenz fortgesetzt.

Regel 2:

Wenn	ein Fakt Xi existiert UND (in Baufortschrittsdaten das Muster <i>herannahende Bauphase</i> ODER das Muster <i>Erhöhung der Vortriebsgeschwindigkeit</i> auftritt,)
Dann	erzeuge einen Fakt Yi, der die Situation beschreibt (den entsprechenden Fakt Xi markiert.)

Aus den n ursprünglichen Verdachtsfällen Xi werden jene m Fälle Yi herausgefiltert, die entweder durch das Muster *herannahende Bauphase* oder das Muster *Erhöhung der Vortriebsgeschwindigkeit* erklärbar werden (eventuell treffen auch beide Muster gleichzeitig zu). Die beiden Muster können analog zu oben empirisch als spezielle Konstellationen von Baufortschrittsfakten mehr oder weniger komplex definiert werden. Von Interesse sind nun jene n-m Fälle

Zi, die bis dato nicht erklärbar sind und daher weiterhin auffällig bleiben. Diese sollen durch die nächste, hierarchisch nachgeschaltete Regel 3 auch noch explizit zum Zwecke der Weiterverarbeitung in die Wissensbasis aufgenommen werden.

Regel 3:

Wenn	ein Fakt Xi existiert für den KEIN Fakt Yi existiert,
Dann	erzeuge einen Fakt Zi, der den Fakt Xi markiert.

Ausgangsfakten (Output des Systems): n Fälle Xi, m Fälle Yi, n-m Fälle Zi

Der vorliegende Inferenzablauf ist heuristisch in dem Sinne, als er der menschlichen, schrittweisen Vorgehensweise unter zusätzlicher Berücksichtigung gewisser Effizienzkriterien nachempfunden wurde. Der dargestellte Ablauf muss nicht notwendigerweise mit Regel 3 endgültig beendet werden. Mittels weiterer Regeln und Muster können die Ergebnisse verbessert, allenfalls weitere Ursachen ausgeschieden werden. Entscheidend ist letztlich die Qualität des Outputs im Sinne der Fragestellung: „Kommt ein Benutzer zum selben Ergebnis wie das System“. Die Antwort darauf ist im Wesentlichen von zwei Faktoren abhängig:

- Qualität der Eingangsdaten
 - Liegen Messfehler vor ?
 - Wurde der Baufortschritt korrekt/häufig genug erfasst ?

Eine mangelhafte Qualität der Eingangsdaten (Messfehler, fehlende Daten, etc.) führt, falls nicht vorab erkannt, zwangsläufig zu fehlerhaften oder fehlenden Schlüssen.

- Qualität der repräsentierten Muster
 - Wann ist eine Geschwindigkeitszunahme unter Berücksichtigung der Messgenauigkeit signifikant ?
 - Innerhalb welcher Distanz gilt eine Bauphase als *herannahend* ?

Die möglichen Muster sind vom Wissensingenieur weitgehend vollständig zu ermitteln. Komplexe Repräsentationen erlauben dabei die Berücksichtigung von Sonderfällen und Ausnahmen und verbessern damit die Korrektheit der gefundenen Auffälligkeitsfälle (Trefferrichtigkeit). Mit steigender Anzahl verschie-

dener Muster erhöht sich, zumindest potentiell, deren Anzahl (Trefferquote). Beide Faktoren zusammen beeinflussen das Kompetenzniveau des Systems.

Unterstützend für das Anwendungsgebiet Tunnelbau ist letztlich, dass die Ergebnisse selbst bei großen Datenmengen und kontinuierlich einlangenden Daten innerhalb kürzester Zeit vorliegen und verfügbar sind. Deren Überprüfung muss zur Sicherheit zwar immer noch vom Experten vorgenommen werden, die entsprechenden Verdachtsfälle X_i , Y_i und Z_i sind dann aber bereits dokumentiert, entsprechende Grafiken erzeugt. Das System kann bei Vorhandensein geeigneter Alarmierungsfunktionen zur laufenden Überwachung des Stabilisierungsverhaltens, aber auch zu dessen nachträglicher Beurteilung herangezogen werden. Jedenfalls provoziert es eine Veränderung der bisherigen periodischen Interpretationsweise: „Alles ab 14h und der Reihe nach“ in Richtung: „Wichtiges immer sofort und dann alles ab 14h der Reihe nach“.

3 Beispiel 2: Erkennen (fehler)auffälliger Verschiebungen

Wie bereits erwähnt, können Fehler in den Eingangsdaten fehlerhafte oder fehlende Schlüsse des Systems verursachen. Für die Aufdeckung von Fehlern speziell in den Verschiebungsdaten sind im Anwendungsgebiet verfahrensbedingt (keine Redundanz der Messungen, keine explizite Erfassung physikalischer Einflüsse wie Refraktion, etc.) rechnerisch-statistische Prüfmöglichkeiten kaum anwendbar. Die Beurteilung von nach erfolgter Auswertung berechneter Qualitätsparameter wie z.B. Standardabweichungen, Restklaffungen, etc. vermag zumeist nur in eindeutigen Fällen ausreichend Gewissheit über die Existenz von Fehlern zu geben. Daher können Messfehler oftmals nur nachträglich im Zuge der Zusammenschau mit anderen und/oder bisherigen Messergebnissen empirisch erkannt und mehr oder weniger unsicher vermutet werden.

Dieser Fähigkeit liegt zum einen jenes Erfahrungswissen zugrunde, wie sich bestimmte Fehler in den Messergebnissen manifestieren, in diesen also bestimmte auffällige Erscheinungen und Muster hervorrufen, zum anderen kann Wissen darüber vorliegen, ob unter den gegebenen Randbedingungen des Projekts die zu betrachtenden Messergebnisse überhaupt plausibel sind.

Repräsentation und Lösung des beschriebenen Problems können wieder auf ein Verfahren der Mustererkennung zurückgeführt werden, wobei dem speziellen Aspekt der Unsicherheit Rechnung zu tragen ist. In Abbildung 1 wird ein im Anwendungsgebiet manchmal anzutreffendes Fallbeispiel skizziert.

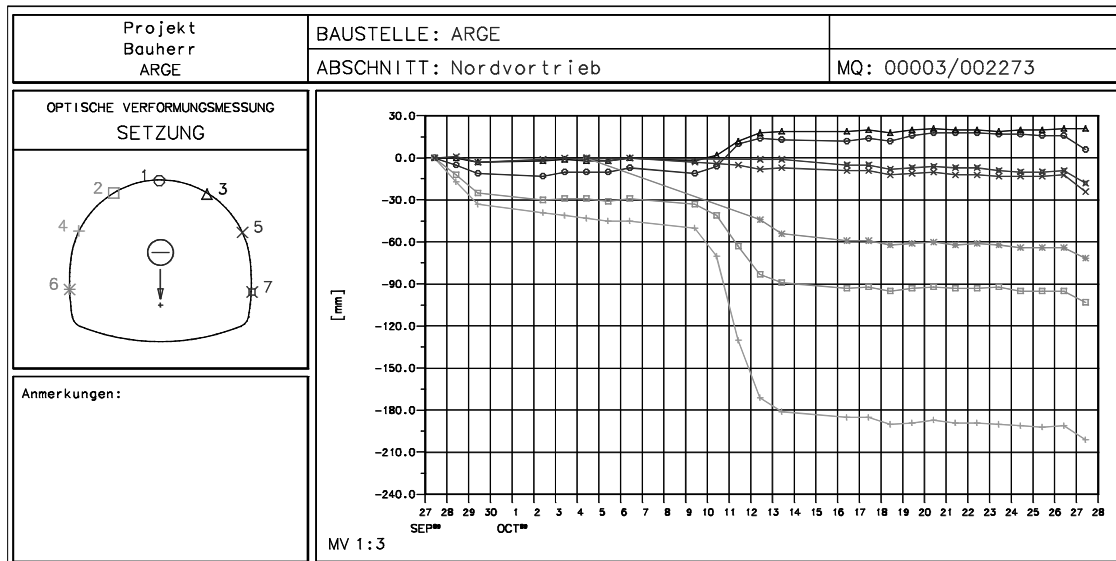


Abb. 1: Setzungsentwicklung von sieben Messpunkten in Messquerschnitt 3

Die Auswertung der letzten Messepoche ergibt eine signifikante neuerliche Setzung bei zumindest sechs von sieben Messpunkten. Der Setzungszuwachs ist in allen sechs betroffenen Punkten annähernd gleich groß. Der Setzungsverlauf stellt sich als auffälliges Muster dar und bedarf einer näheren Untersuchung. Sein Erkennen durch das wissensbasierte System sei durch die Anwendung der Regel 1 aus Kapitel 2 erfolgt. Demnach werden sechs Fakten X_i für die Messepoche i in der Wissensbasis abgelegt.

Geschlossen werde ferner, dass das Herannahen einer nachfolgenden Bauphase als Ursache des Phänomens nicht in Frage kommt, das in Kapitel 2 beschriebene Muster demnach nicht mittels Regel 2 gegen die Baufortschrittsdaten gematcht werden kann. Es können keine Fakten Y_i erzeugt werden, in der Folge werden mittels Regel 3 sechs Fakten Z_i generiert, der Setzungsverlauf bleibt also weiterhin auffällig. Im nächsten Schritt werde bereits, geotechnischen Experten eine gewisse Vorgehenstendenz unterstellend, das Vorliegen eines Messfehlers vermutet. In der Praxis würde ein solcher Experte beim Vermesser nun rückfragen, ob es besondere Probleme bei der Messung oder Auswertung gegeben habe. Zur Vermeidung umfangreicher Frage-Antwortdialoge umgeht das konzipierte System diese Rückfrage und ermittelt stattdessen, welche Fehlerarten als Ursachen grundsätzlich in Frage kommen und wie wahrscheinlich diese (in empirischem Sinne) sind.

Die Ermittlung der Fehlerarten basiert auf einer einfachen, wiederum empirischen Fehlermuster-Fehlerart-Zuordnung. Jedem Fehlermuster ist eine nach Apriori-Wahrscheinlichkeiten gereihete Liste von k Fehlerarten F_i zugeordnet.

Diese Fehlerarten werden im Falle des Matchens des Fehlermusters über eine Regel als Fakten im System abgelegt. Diese Fakten triggern spezifische Inferenzprozesse zur Ermittlung o.a. empirischer (nicht statistischer) Wahrscheinlichkeitswerte.

Als in praktischer Hinsicht besonders geeignetes Verfahren quantitativen unsicheren Schließens hat sich für regelbasierte System die Methode der *Certainty Factors* (SHAPIRO, St.C. [1992]) herausgestellt. Hierbei werden den Ausgangsfakten und Regeln initiale numerische Wahrheitswerte, sogen. *Certainty Factors*, zugeordnet, die in weitestem Sinne das Zutreffen des Fakts bzw. des mit der Regel ausgedrückten Zusammenhangs intuitiv beschreiben. Über wiederum intuitiv gewählte mathematische Verknüpfungsoperationen werden diese Wahrheitswerte auf abgeleitete Fakten propagiert. Die initialen Apriori-Wahrheitswerte der Fehlerarten werden daraufhin schrittweise unter Heranziehung zusätzlichen Wissens bis zu einem Endwert verändert.

Im vorliegenden Beispiel werde als eine mögliche Fehlerart eine fehlerhafte Standpunkthöhe angenommen. Jeder der sechs Messpunkte, der das Fehlermuster zeigt, trägt zu einer Erhöhung des Apriori-Wahrheitswertes dieser Fehlerart bei. Jener Messpunkt, der das Muster nicht zeigt, verringert diesen. Überhaupt werden nun sämtliche Messungen dieses Standpunkts zu allen weiteren Messquerschnitten und -punkten zur Untersuchung herangezogen, Hinweise und Gegenhinweise verrechnet. Der Aspekt der Größengleichheit des Setzungszuwachses wird zusätzlich berücksichtigt, zumal dieser logisch mit der angenommenen Fehlerart in Zusammenhang steht, entfernte Punkte müssen ebenso wie nahe dieselbe Größenordnung an Setzungszuwachs aufweisen. Ist dies nicht der Fall, verringert sich der Wahrheitswert dramatisch. Ebenso wird untersucht, ob es benachbarte Messpunkte gibt, die von einem anderen Standpunkt aus gemessen wurden. Zeigen diese das Fehlermuster nicht, erhöht sich mit jedem dieser Punkte erneut der Wahrheitswert.

Unter der Annahme, dass keine weiteren als die in Abb. 1 ersichtlichen Messungen vorhanden sind, ergibt sich bei dem Verfahren ein endgültiger *Certainty Factor* für die angenommene Fehlerart von 0.87 innerhalb einer Skala von -1 (= nicht zutreffend) über 0 (= keine Aussage) bis 1 (= zutreffend).

Die qualitative Beurteilung des Ergebnisses kann am besten über einen Vergleich mit der eigenen Einschätzung des Falls erfolgen. Hierzu müssten, um vergleichen zu können, natürlich auch die End-Wahrheitswerte aller weiteren Fehlerarten betrachtet werden. Kommt man (besser: ein Experte) annähernd zur selben Meinung, arbeitet das System zufriedenstellend, andernfalls ist durch geeignetes Tuning wie z.B der initialen *Certainty Factors* das Ergebnis an die

menschliche Expertise anzupassen. Die Unsicherheit bei der initialen Parametrisierung des Verfahrens ist ein gewisser Schwachpunkt. Darüber hinaus treten Schwierigkeiten im Falle des gleichzeitigen Vorliegens mehrerer Fehler in den Daten auf. Aber ohnehin gilt immer die Devise: „Der Experte hat das letzte Wort“.

4 Beispiel 3: Erkennen auffälliger Verschiebungen durch Prognose- und Bewertungswissen

Vor Baubeginn liegen in aller Regel bereits mehr oder weniger umfangreiche und genaue Kenntnisse über das zu durchörternde Gebirge, die geplanten Stützmittel, das geplante Vortriebsschema, etc. vor. Unter der Annahme entsprechender Randbedingungen können daher bereits Prognosen (z.B. mittels numerischer Simulationen) über die zu erwartenden Verschiebungen berechnet werden. Zusätzlich kann Erfahrungswissen über die Verschiebungen aus vergangenen *vergleichbaren* Bauprojekten vorliegen. Bald nach Baubeginn liegen die ersten tatsächlichen Verschiebungen vor und bedeuten ein bereits sehr konkretes Wissen, welches zur Prognose zukünftiger Verschiebungen im Sinne zeitlicher und räumlicher Extrapolation genutzt werden kann. Darüber hinaus existiert projektunabhängiges Fachwissen (Lehr-, Schulwissen), das es ermöglicht, wennauch wenig genaue, so doch zumindest allgemeine Kriterien und Vorhersagen abzuleiten.

Die laufende Gegenüberstellung verschiedenster Prognosen (oder Erwartungen) und der Realität ist Bestandteil jeder Interpretation und begleitet das gesamte Projekt. Ein Nachahmen dieser Art *Vergleichsverfahren* mittels wissensbasierter Technik soll anhand des folgenden einfachen Beispiel (Abb. 2) erläutert werden.

Aufgrund homogener Gebirgsverhältnisse und bisheriger Erfahrungen im Projekt werde für die zeitliche Entwicklung der Setzungsdifferenzen der Messpunkte 2 und 3 in Messquerschnitt 9 der Wert 0 erwartet. Unter Berücksichtigung der Messgenauigkeit und einer Toleranz seien Abweichungen von dieser Erwartung kleiner $\pm 23\text{mm}$ (grauer Balken, Abb.2) noch unauffällig. Eine Differenz von $\pm 80\text{mm}$ werde allerdings bereits als *stark auffällig* eingestuft.

Wie ersichtlich wird mit obigen Aussagen in Zusammenhang mit der Prognose auch jenes Bewertungswissen ausgedrückt, inwieweit Abweichungen dem Experten *auffällig* erscheinen. Dem System kann dieses Wissen durch Parametrisierung eines Bewertungsmodells (Abb. 3) bekanntgegeben werden. Es wird spezifiziert, dass ab einer Abweichung von 23 mm eine lineare Steigerung der *Auffälligkeit* die Ansicht des Experten intuitiv am besten approximiere.

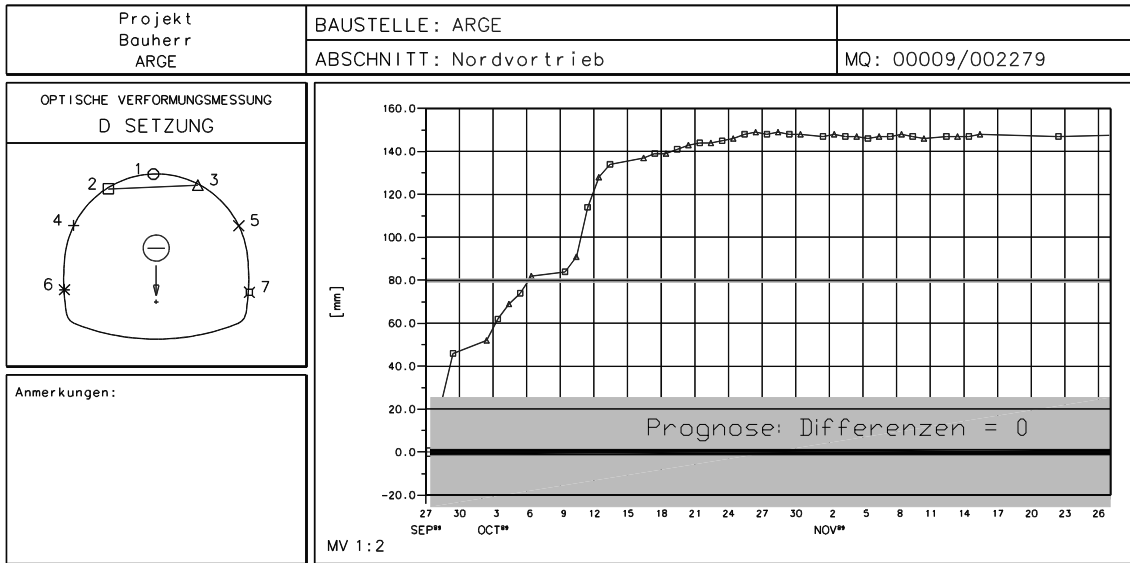


Abb. 2: Differenzsetzungsentwicklung von zwei Punkten in Messquerschnitt 9 und Prognose

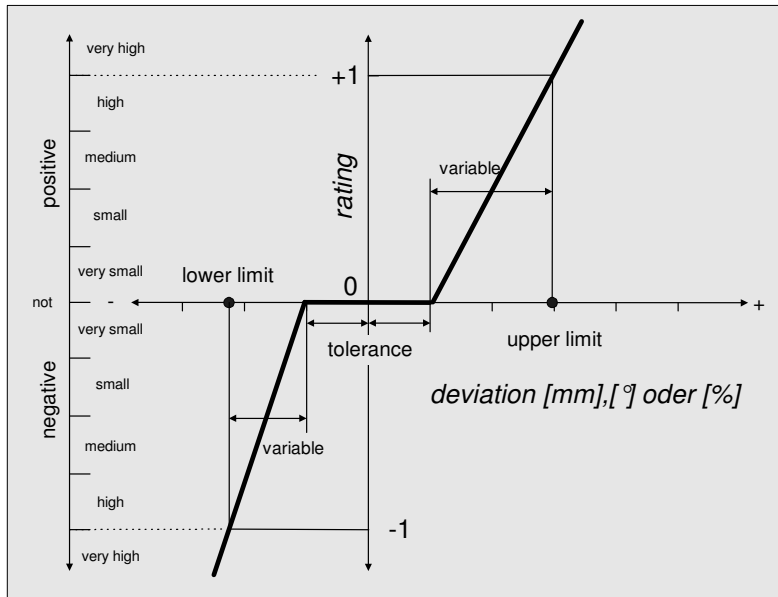


Abb. 3: Bewertungsmodell für Prognoseabweichungen

Wird nun eine Prognose und ein zugehöriges Bewertungsmodell spezifiziert, werden sie in entsprechende Fakten übersetzt und in die Wissensbasis aufgenommen. Zugehörige Regeln der Form:

Wenn	Verschiebungen einlangen UND eine Prognose für sie vorliegt UND ein Bewertungsmodell für die Prognose vorliegt,
Dann	berechne und bewerte die Abweichungen UND erzeuge entspr. Bewertungsfakten.

sowie:

Wenn	in Bewertungen das Muster <i>auffällig</i> auftritt,
Dann	erzeuge einen output.

wenden konsequent das vorhandene Wissen an. Das Muster *auffällig* in letzter Regel kann eine einmalige Überschreitung einer Bewertungsschranke beschreiben, sich aber auch komplexer darstellen. Im vorliegenden Beispiel (Abb. 2) ist nach wenigen Messepochen bereits klar, dass die ursprgl. Prognose der Realität nicht standhält. Nach ein paar weiteren wird auch die Schranke *stark auffällig* überschritten.

Mittels Fakten und Regeln können auf diese Art flexibel beliebige Prognosen bzgl. verschiedenster Verschiebungsaspekte sowie Bewertungsmodelle (auch verschiedene Modelle für eine Prognose) repräsentiert und ausgewertet werden. Als Prognosen können prinzipiell alle Arten mathematisch darstellbarer Funktionen fungieren, sofern dem System ihr zugrundeliegender Algorithmus zuvor mitgeteilt wurde. In gleicher Weise trifft dies auf die den Bewertungsmodellen zugrundeliegenden Kurven zu. Eine konventionelle prozedurale Programmierung dieser Aufgabenstellung wäre unverhältnismäßig in punkto Aufwand, Erweiterbarkeit und Flexibilität.

Nachteilig am gewählten Weg ist, dass das System a priori über kein Wissen dieser Art verfügt, daher auch nur von kompetenten Nutzern gefüttert werden sollte. Es inferenziert kein neues Wissen, sondern wendet Vorhandenes an. Demzufolge kann theoretisch auch jeder Unsinn eingegeben und ungehindert zu ebenso unsinnigen Ergebnissen abgearbeitet werden.

5 Schlussfolgerung

Es wurde versucht, drei spezielle Aufgabenstellungen bei der geotechnischen Beurteilung geodätischer Verschiebungsdaten im Tunnelbau mit Hilfe wissensbasierter Techniken zu bearbeiten. Ziel ist die Unterstützung des Experten durch ein rasches und automatisches Erkennen sogenannter *Auffälligkeiten*, wofür heute insbesondere bei der Bewältigung großer Datenmengen und der Überwachung kontinuierlich einlangender Daten Bedarf besteht. Die drei Techniken beruhen auf der Erkennung empirischer Faktenmuster, die als Vorbedingungen von Regeln mit den tatsächlichen Fakten der Wissensbasis gematcht werden. Die Spezifizierung der Muster ist Aufgabe der Wissensakquisition und qualitätsbestimmender Hauptfaktor der Ergebnisse.

Aus derzeitiger Sicht kann für das Erkennen einfacher (klar abgrenzbarer) Auffälligkeiten in den Verschiebungen das Erreichen eines gewissen Kompetenzniveaus in Aussicht gestellt werden. Bis dato unmöglich ist es, den umfassenden Fähigkeiten menschlicher Experten auch nur annähernd mit Hilfe wissensbasierter Verfahren beizukommen. Zudem liegen im Anwendungsgebiet viele der in eine umfassende Interpretation einzubeziehenden Daten und Informationen in einer für den Computer nicht (direkt) verwertbaren Form vor (Skizzen, Bilder, etc.). In punkto Geschwindigkeit ist eine Überlegenheit gegenüber dem Experten jedenfalls auch derzeit schon zu erreichen.

Literatur:

- BONISONE, P., DECKER, K. [1985]: Selecting uncertainty calculi and granularity: an experiment in trading-off precision and complexity. In: Proc. of Workshop on Uncertainty and Probability in Artificial Intelligence, S. 57-66, Los Angeles, CA, 1985.
- SHAPIRO, St.C. [1992]: Encyclopedia of Artificial Intelligence. John Wiley & Sons, Inc. Publishers - New York, 2nd edition, 1992.
- CHMELINA, K. [2002]: A Concept for Intelligent 3D-Displacement Monitoring in: Proceedings of the 2nd Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering. Berlin, May 21-24, 2002.
- CHMELINA, K. [2002]: Wissensbasierte Analyse von Verschiebungsdaten im Tunnelbau, Dissertation, Inst. für Geodäsie und Geophysik, TU-Wien, 2002.
- SCHUBERT, W., STEINDORFER, A., BUTTON, E.A. [2002]: Displacement monitoring in tunnels – an overview. Felsbau 20, No. 2, 7-15.

Anschrift:

Dipl.-Ing. Dr. Klaus Chmelina
Geodata ZT GmbH, Zweigstelle Wien (www.geodata.at)
Geyschlägergasse 14
A-1150 Wien
chmelina@geodata.at