

# Heuristische Echtzeit-Fehlererkennung bei Deformationsmessungen während des Tunnelvortriebs

Klaus Chmelina, Heribert Kahmen, Thomas Eiter und Uwe Egly

## Zusammenfassung

Die vorgestellte *Certainty-Factor*-Methode ist ein aus dem Forschungsgebiet Wissensbasierter Systeme stammendes Ad-hoc-Verfahren quantitativen, unsicheren Schließens. Sie beruht auf der Angabe numerischer Werte zur Beschreibung der Sicherheit von Aussagen (z. B. über das Vorliegen von Fehlern in Messdaten) und deren Verrechnung zu einer Sicherheit einer Endaussage (z. B. über das Vorliegen einer bestimmten Fehlerursache). Sie erlaubt damit speziell die Repräsentation und Verarbeitung des unsicheren Expertenwissens eines Anwendungsgebiets. In dieser Arbeit wird die Anwendung der Methode zur Fehleranalyse von Verschiebungsdaten im Tunnelbau erörtert.

## Summary

*The outlined Certainty Factor method, originally developed in the research area of Knowledge Based Systems, represents an ad hoc concept of quantitative, uncertain reasoning. It is based on numerical values, so called Certainty Factors, expressing the certainty of statements (e. g. about the existence of errors in monitoring data) and an intuitive algorithm processing them to an output certainty (e. g. of a possible error cause). Therefore it allows the representation of and reasoning from the uncertain expert knowledge of a domain. This paper discusses an application of this method for error analysis of displacement data in tunnelling.*

## 1 Einleitung

Die »Neue Österreichische Tunnelbaumethode (NÖT)« folgt einem Konzept, welches das den Hohlraum umgebende Gebirge durch Aktivierung eines Gebirgstragringes zu einem tragenden Bestandteil macht (Müller und Fecker 1978). Die Methode hat das Ziel, die beim Auffahren eines Hohlraums auftretenden Spannungsumlagerungsvorgänge gesteuert und in möglichst wirtschaftlicher Weise ablaufen zu lassen. Um den Verformungsvorgang zu kontrollieren, werden umfangreiche Verformungsmessungen durchgeführt. Der für deren Interpretation zuständige geotechnische Experte hat folglich, zusätzlich zu seinen weiteren Aufgaben auf der Baustelle, laufend sehr umfangreiches Datenmaterial zu sichten und zu beurteilen. Um ihn bei diesen komplexen Analysen zu entlasten, ist ein Prototyp eines Wissensbasierten Systems entwickelt worden. Typische Aufgaben dieses Systems sind: Beurteilung von Verformungsgeschwindigkeiten einzelner Messpunkte in Abhängigkeit vom aktuellen Baufortschritt, Beurteilung von Verschiebungen in Bezug

auf persönliche oder offizielle Prognosen und die Detektion von Messfehlern in den primären Ausgangsdaten (Chmelina 2002). Auf den letzten Fall soll hier exemplarisch näher eingegangen werden.

Häufig sind es Nicht-Geodäten (z. B. Geologen, Geotechniker, Fachexperten in weitestem Sinn) aber in zunehmenden Maße auch Programmsysteme, von denen verlangt wird, geodätische Daten zu kontrollieren, zu beurteilen und gegebenenfalls aus ihnen Entscheidungen abzuleiten. Zur Vermeidung fehlerhafter Schlüsse ist hierfür weitgehend fehlerfreies Datenmaterial Voraussetzung. Das Erkennen von Fehlern in bzw. aus den Daten ist jedoch nicht immer einfach, ebenso das Forschen nach ihren Ursachen. Im Falle fehlenden geodätischen Fachwissens wird man im Allgemeinen rasch überfordert sein, jedoch ist in der Praxis häufig ein Hinzuziehen eines Vermessungsspezialisten nicht (rechtzeitig) möglich. In besonderem Maße gilt dies für zeitkritische Aufgabenstellungen und automatisierte Messprozesse, in denen periodisch oder kontinuierlich Ergebnisse produziert und zeitnah oder sogar in Echtzeit beurteilt werden müssen (z. B. bei Steuerungs- und Überwachungsaufgaben). Besonders schwierig wird die Fehlererkennung und Ursachensuche, falls

- große Datenmengen vorliegen und in kurzer Zeit zu prüfen sind,
- die zu beurteilenden Daten Ergebnis einer Kette von Berechnungsschritten sind (z. B. Koordinaten oder davon abgeleitete Größen), deren Erzeugung u. U. komplexe physikalische und mathematische Modelle zugrunde liegen,
- die Redundanz der Daten gering ist und alternative, direkte Kontrollmöglichkeiten wie z. B. Nachmessungen oder Vergleiche mit anderen Messergebnissen nicht möglich sind,
- allgemein wenig Vorwissen über praktisch plausible, theoretisch mögliche oder empirisch zu erwartende Ergebnisse vorliegt,
- für das Auftreten einer bestimmten Fehlercharakteristik in den Daten grundsätzlich mehrere Ursachen in Frage kommen können,
- sich umgekehrt auch eine bestimmte Ursache in mehreren, verschiedenartigen Fehlerbildern zeigen kann,
- das gleichzeitige Vorliegen mehrerer Ursachen und damit das Sich-Überlagern (Sich-Verstärken, Sich-Aufheben) mehrerer Fehlerbilder nicht auszuschließen ist.

In vielen praktischen Anwendungen treffen mehrere der oben angegebenen Erschwernisse – und eventuell noch weitere – zu. In diesen Fällen sind Fehlererkennung und

Ursachenermittlung inhärent unsicher und konventionellen Techniken (statistische Tests, Mustererkennung) nur schwer zugänglich. Mit diesen zumeist unliebsamen Zusatzaufgaben werden die eigentlichen Datennutzer folglich oftmals allein gelassen. Bei qualifizierten Experten lassen sich hierfür jedoch gewisse schrittweise Vorgehensstrategien erkennen und mittels wissensbasierter Techniken (teil)automatisieren.

## 2 Generelle Vorgehensweise

In begrifflicher Anlehnung an die Diagnostik im medizinischen und technischen Bereich soll nachfolgend eine solche, häufig angewandte Strategie skizziert werden:

1. **Erkenne (suche oder stoße zufällig auf) ein initiales Fehlermerkmal**  
z.B. ein bestimmtes Muster oder einen auffälligen Parameter in einem Ergebnis, eine Abweichung von einem erwarteten Ergebnis. Entscheidend sind insbesondere Merkmale, die für ein anstehendes Analyseziel von Bedeutung sind, d. h., es wird nicht unbedingt nach allen möglichen Merkmalen gesucht.
2. **Bewerte die Stärke, den Grad der Auffälligkeit des Merkmals**  
z.B. anhand der Ausprägung des Musters, der Größe des Parameters, der Größe der Abweichung von einem erwarteten Ergebnis. Bewertet wird, wie weit die Größe von Relevanz für das Analyseziel ist (ein Parameter kann aus z.B. messtechnischer Sicht zwar groß, für das Analyseziel aber immer noch unbedeutend klein sein).
3. **Falls die Bewertung eine Schranke übersteigt, ist die Situation relevant und interessant**  
Ein einzelnes, relevantes Fehlermerkmal weist also auch eine relevante Größenordnung auf, das Vorliegen eines Fehlers wird jetzt vermutet und ist näher zu untersuchen.
4. **Ermittle mögliche Fehlerursache(n)**  
Das erkannte Fehlermerkmal ist ein **Symptom** für ein oder mehrere Ursachen, zwischen Merkmal und Ursache existiert ein bekannter Zusammenhang.
5. **Wähle eine mögliche Fehlerursache aus**  
z.B. die intuitiv wahrscheinlichste oder die gerade am schnellsten, am unaufwändigsten überprüfbar. Es erfolgt also eine Reihung der möglichen Ursachen nach gewissen Erfolgskriterien.
6. **Suche weitere, die gewählte Ursache bestätigende Symptome**  
z.B. Symptome, die bei Vorliegen der angenommenen Ursache vorhanden sein könnten, sollten oder müssten. Die Suche wird effizient gestaltet, z. B. kann nach jenen Symptomen zuerst gesucht werden, die am stärksten oder bereits direkt zur Bestätigung der Ursache beitragen würden oder nach jenen, die am einfachsten zu finden sind.
7. **Bestimme Anzahl und Stärke der gefundenen Symptome**  
analog Schritt 2.
8. **Suche Hinweise, die gegen die gewählte Ursache sprechen**  
z. B. Symptome, die bei Vorliegen der angenommenen Ursache vorhanden sein könnten, sollten oder müssten aber nicht vorhanden sind; Merkmale, die (explizit, direkt, unmittelbar) gegen die Ursache sprechen.
9. **Bestimme Anzahl und Stärke der gefundenen Gegenhinweise**  
analog Schritt 2.
10. **Wäge Für und Wider ab, ermittle die Sicherheit der Ursache**  
Es erfolgt eine Art Verrechnung aller positiven und negativen Hinweise zu einer Gesamtsicherheit. Danach wird die nächste mögliche Ursache ausgewählt und gemäß der Punkte 6–10 verfahren. Am Ende liegt eine Liste der möglichen Ursachen, gereiht nach deren Sicherheiten, vor.
11. **Diagnose**  
Aus der Liste wird in Abhängigkeit der Sicherheiten und wiederum gewisser Schranken eine unsichere Diagnose erstellt. Diese kann aus einer, mehreren oder schlimmstenfalls auch keiner Ursache bestehen.

In den einzelnen Arbeitsschritten kommt wie ersichtlich spezifisches, vielfach unsicheres Expertenwissen zum Einsatz. Dieses Wissen umfasst Faktenwissen über Fehlermerkmale und zugehörige mögliche Fehlerursachen, Bewertungswissen über die Relevanz der einzelnen Merkmale für ein Analyseziel, Wissen über die Art der Gewichtung bzw. Verrechnung von Symptomen zu einem Endergebnis (einer unsicheren Diagnose) sowie Metawissen zur effizienten Steuerung der einzelnen Arbeitsschritte (Suchkriterien, Prioritäten, Abbruchkriterien, etc.).

## 3 Unsicheres Schließen mittels Certainty Factors

Eine weitverbreitete Methode zur Repräsentation von unsicherem Wissen sind sogenannte *Certainty Factors* (Shapiro 1992). In der Praxis hat man bei diagnostischen Fragestellungen mit ihnen gute Erfahrungen gemacht und es ist eine Vielzahl von Varianten vorgeschlagen worden; ein Vergleich mehrerer Varianten findet sich in Bonison und Decker (1985); für weitere Informationen zu Certainty Factors wird auf Shapiro (1992) verwiesen. Alternative Techniken zur Repräsentation und Verarbeitung von Unsicherheit sind

- subjektive bzw. statistische Wahrscheinlichkeiten, unter Verwendung des Bayes'schen Theorems,
- Plausibilitätsmaße und
- Fuzzy Sets.

Die Vorteile von Certainty Factors gegenüber diesen Techniken sind allgemein deren einfache Handhabbarkeit und Verständlichkeit. Eine Schwierigkeit ist die Festlegung der anfänglichen Certainty Factors der Fakten.

Unter Certainty Factors versteht man nun Zahlenwerte, die Wissens-elementen wie Fakten und Regeln zugeordnet sind und ein Maß für ihre »Gültigkeit« darstellen. Für einen Fakt bedeutet dieser Wert, mit welcher Sicherheit er zutrifft, und für eine Regel etwa der Form  $A \rightarrow B$  (»aus A folgt B«), mit welcher Sicherheit sie anwendbar ist, das heißt, dass bei Vorliegen von der Vorbedingung A auf B geschlossen werden kann. Wichtig dabei ist, dass es sich bei diesen Werten nicht um Wahrscheinlichkeiten im mathematischen Sinn handelt, sondern um *heuristische* Werte, die aus Erfahrung bzw. subjektiver Einschätzung von Experten stammen. Mittels spezieller Verknüpfungsfunktionen können Certainty Factors von Fakten kombiniert und unter Anwendung von Regeln neue Certainty Factors gewonnen werden.

Certainty Factors sind als heuristische Approximation eingeführt worden, weil eine exakte wahrscheinlichkeitstheoretische Erfassung und Modellierung von Zusammenhängen in Anwendungen meist scheitert. Gründe dafür sind

- die Unkenntnis der exakten Wahrscheinlichkeit des Zutreffens von Fakten,
- die Unkenntnis der Korrelation des Auftretens von Fakten im Allgemeinen (z. B. Unabhängigkeit),
- die komplexe Berechnung von Wahrscheinlichkeiten schon bei Wissensbasen geringer Größe.

In regelbasierten Expertensystemen spielen vor allem die konjunktive und die disjunktive Verknüpfung sowie die Propagierung von Certainty Factors eine wichtige Rolle. Vereinfacht hat eine Regel die Form:

$$P_1 \ \& \ P_2 \ \& \ \dots \ \& \ P_n \ \rightarrow \ K \quad (cr)$$

wobei  $P_1, P_2, \dots, P_n$  die *Prämissen* (Vorbedingungen) der Regel sind,  $K$  die *Konklusion* ist und  $cr$  eine Zahl ist, die die Stärke des Zusammenhangs zwischen den Prämissen und der Konklusion festlegt. Jede Prämisse ist mit einem Certainty Factor  $cf_1, cf_2, \dots, cf_n$  behaftet, der aus einem Intervall  $[a, b]$  stammt, wobei  $a$  und  $b$  die untere bzw. obere Grenze festlegen (intuitiv: »nicht zutreffend« bzw. »zutreffend«). Am häufigsten werden die Intervalle  $[0, 1]$  und  $[-1, 1]$  verwendet. Der Ablauf des Schließens unter der Verrechnung von Certainty Factors ist wie folgt:

1. In einer Regel, die zur Anwendung kommen soll, werden zunächst die Certainty Factors der einzelnen Prämissen  $P_1, P_2, \dots, P_n$  unter Zuhilfenahme einer »konjunktiven« Verknüpfung  $U(x, y)$  der Reihe nach in einen Certainty Factor  $x$  übergeführt ( $x = U(x_{n-1}, cf_n)$ , wobei  $x_{n-1} = U(x_{n-2}, cf_{n-1})$ , ...,  $x_2 = U(cf_1, cf_2)$ ). Die Funktion  $U(x, y)$  erfüllt dabei bestimmte Bedingungen, darunter Assoziativität ( $U(x, U(y, z)) = U(U(x, y), z)$ ) und Kommutativität ( $U(x, y) = U(y, x)$ ).

2. Danach wird der berechnete Wert  $x$  mit der Stärke  $cr$  der Regel kombiniert und auf die Konklusion  $K$  propagiert. Am häufigsten erfolgt dies durch das Produkt  $cr * x$ , wobei  $cr$  so gewählt ist, dass der resultierende Wert im zulässigen Bereich  $[a, b]$  liegt.
3. Im letzten Schritt werden bei mehrfacher Ableitung derselben Konklusion  $K$  durch verschiedene Regeln  $R_1, R_2, \dots, R_m$  die einzelnen erhaltenen Certainty Factors  $f_1, f_2, \dots, f_m$  mit einer »disjunktiven« Verknüpfung  $O(x, y)$  zu einem Wert  $y$  zusammengefasst ( $y = O(y_{m-1}, f_m)$ , wobei  $y_{m-1} = O(y_{m-2}, f_{m-1})$ , ...,  $y_2 = O(f_1, f_2)$ ), die ähnlich wie  $U(x, y)$  bestimmte Axiome erfüllt, darunter Assoziativität und Kommutativität.

Ausgehend von Fakten mit initialen Certainty Factors werden durch wiederholte Anwendung von Regeln die Certainty Factors einzelner Fakten verändert, bis die Regelanwendung stoppt. Das Ergebnis enthält eine Menge von Fakten, deren Certainty Factors als Bewertungen für deren Zutreffen zu sehen sind.

Das Expertensystem MYCIN (Buchanan und Shortliffe 1984) beispielsweise verwendet Certainty Factors aus dem Bereich  $[-1, 1]$  und folgende Verknüpfungsooperatoren: Die »Konjunktion« ist  $U(x, y) = \min(x, y)$ , die Propagierung erfolgt durch  $cr * x$ , und die »Disjunktion« ist:

$$O(x, y) = \begin{cases} x + y - x * y & \text{für } : x, y \geq 0 \\ x + y + x * y & \text{für } : x, y < 0 \\ \frac{x + y}{1 - \min(|x|, |y|)} & \text{für } : x * y < 0 \end{cases}$$

In MYCIN werden nach dem Schritt 2 wie oben Regelanwendungen ignoriert, deren Konklusion ein zu geringes Gültigkeitsmaß besitzen. Üblicherweise wird ein Gültigkeitsmaß größer 0.2 als notwendig erachtet, um einen signifikanten Beitrag der Regel zur Konklusion feststellen zu können.

Das nachfolgende Beispiel stellt einen typischen Fall der Anwendung unsicheren, heuristischen Expertenwissens zur Fehleranalyse nach der in Kapitel 2 beschriebenen Strategie dar.

#### 4 Ein Fallbeispiel wissensbasierter Fehleranalyse im Tunnelbau

Im Zuge eines Tunnelvortriebs werden heute in regelmäßigen zeitlichen Intervallen (typischerweise einmal täglich) Messpunkte an der Tunnellaubung zur Ermittlung von Verschiebungen geodätisch beobachtet. Die Aufnahme der in aufeinander folgenden Messquerschnitten profilartig angeordneten Punkte erfolgt unter Anwendung klassisch geodätischer Verfahren (tachymetrische Messung, Freie Stationierung). Ergebnis der anschließenden

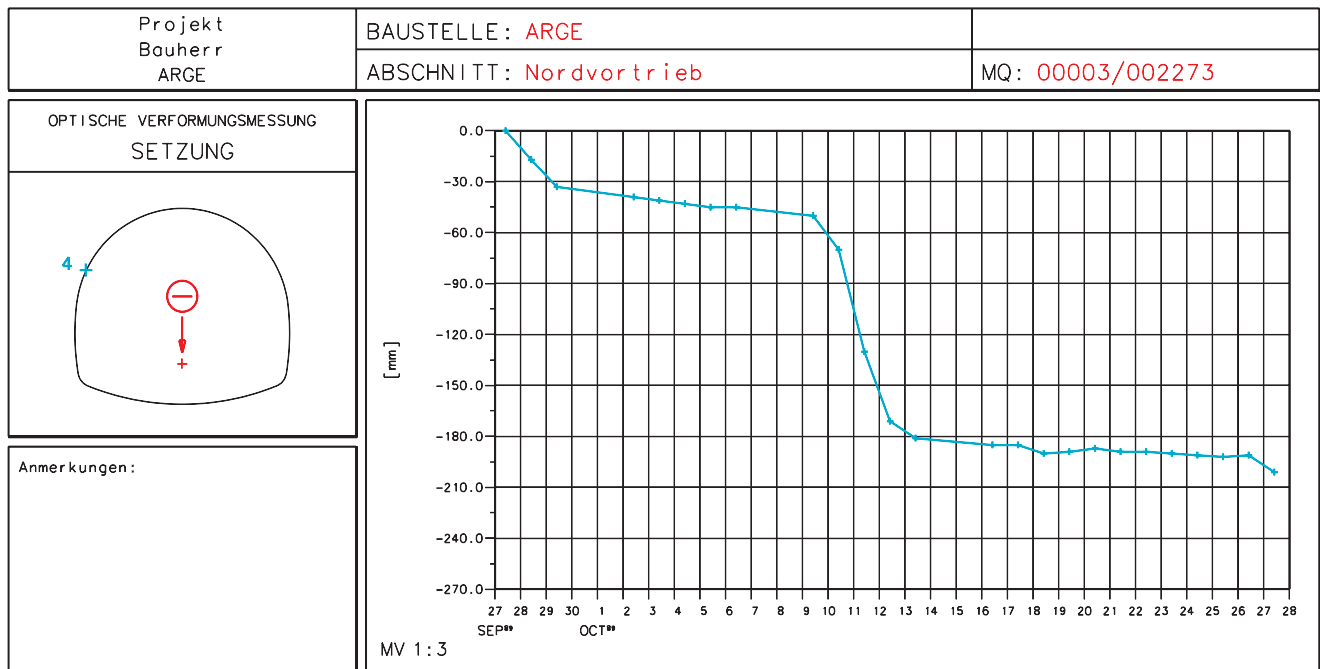


Abb. 1: Zeit-Setzungsentwicklung des Messpunkts 4 in Messquerschnitt 3

Auswertung sind dreidimensionale, auf die Tunnelachse bezogene Koordinaten. Die aus den Messepochen ableitbaren Verschiebungen werden in verschiedenartigen Diagrammen dargestellt und zur weiteren Analyse dem verantwortlichen Geotechniker vorgelegt. Er besitzt in der Regel weder geodätische Fachkenntnisse noch weiß er über spezielle Details (Vorkommnisse während der Messungen, Auswerteprobleme) näher Bescheid. Er vertraut zunächst der Korrektheit der gelieferten Daten innerhalb der geforderten Genauigkeiten und nimmt daher im Allgemeinen auch keine aktive Fehlersuche vor.

Gehen wir in unserem Fallbeispiel davon aus, dass für einen Messpunkt 4 am linken Ulm im Messquerschnitt bei Tunnelmeter 3 am 27.10. folgender Zeit-Setzungsverlauf (Abb. 1) zur Interpretation ansteht.

Wie ersichtlich zeigt die Letztmessung eine neuerliche Setzungszunahme des Punktes. Wäre der Geotechniker diesem Messergebnis gegenüber unkritisch, so müsste er den Beginn einer auffälligen, u.U. Besorgnis erregenden Entwicklung annehmen. Da er an diese jedoch nicht sofort glauben will, betrachtet er die Form des Verlaufs als ein initiales Fehlermerkmal (Schritt 1, Kapitel 2). Für die geotechnische Analyse sei die Stärke des Merkmals (= die Bewertung der Größenordnung von ca. 1 cm neuerlicher Setzungszunahme) bereits von Bedeutung – ein initiales Fehlermerkmal relevanter Stärke liegt also vor (Schritte 2 und 3). Theoretisch kann es eine Reihe von Ursachen für diese »Erscheinung« geben. So z. B. könnte ein individueller Zielfehler, eine mechanische Einwirkung auf die Vermarkung oder eine andere Ursache vorliegen. Aus der Erfahrung werde allerdings das Vorliegen einer fehlerhaften Standpunkthöhe als am wahrscheinlichsten vermutet. Diese Hypothese sei als erste zu untersuchen (Schritte 4 und 5). Als nächstes (Schritte 6 und 7) werden diese Hypothese unterstützen-

de Symptome gesucht. Sinnvollerweise werden hierfür die Zeit-Setzungsverläufe weiterer, vom selben Standpunkt aus beobachteter Messpunkte betrachtet. Es seien dies sechs weitere Punkte desselben Messquerschnitts (Abb. 2).

Es finden sich wie ersichtlich weitere Hinweise auf das Zutreffen der Hypothese (fünf weitere Punkte zeigen das Merkmal). Als weiteres Symptom wird die Größengleichheit der hinweisenden Merkmale beurteilt, d. h., ob die individuellen Setzungszunahmen systematisch gleich groß sind, was ja aufgrund der Hypothese zu erwarten wäre. Je besser diese Forderung von einem Merkmal im Vergleich mit den anderen erfüllt wird, desto stärker kann es die Hypothese stützen. Im vorliegenden Fall ist diese Forderung hervorragend erfüllt; alle tatsächlich sichtbaren Setzungszunahmen sind annähernd gleich groß. In der Folge wird noch nach Gegenhinweisen gesucht (Schritte 8 und 9). Alle Punkte, die das Merkmal nicht oder gar gegensinnig zeigen (Hebungen) sprechen gegen die Hypothese. Wie ersichtlich, kann mit Messpunkt 3 zumindest ein Gegenhinweis gefunden werden. Intuitiv erscheint uns, dass, ohne Kenntnis weiterer Informationen, ein systematischer Höhenfehler potentiell in Frage kommt, wobei aber nicht auszuschließen ist, dass gar kein Fehler vorliegt und die Setzungen real sind.

## 5 Anwendung der Certainty Factor-Methode

Da das obige Fallbeispiel einer strengen Wahrscheinlichkeitstheoretischen Behandlung nicht zugänglich ist und alternative Techniken entweder schwerer verständlich und in den Ergebnissen schlechter nachvollziehbar (Fuzzy Sets) oder allgemein komplizierter und aufwän-



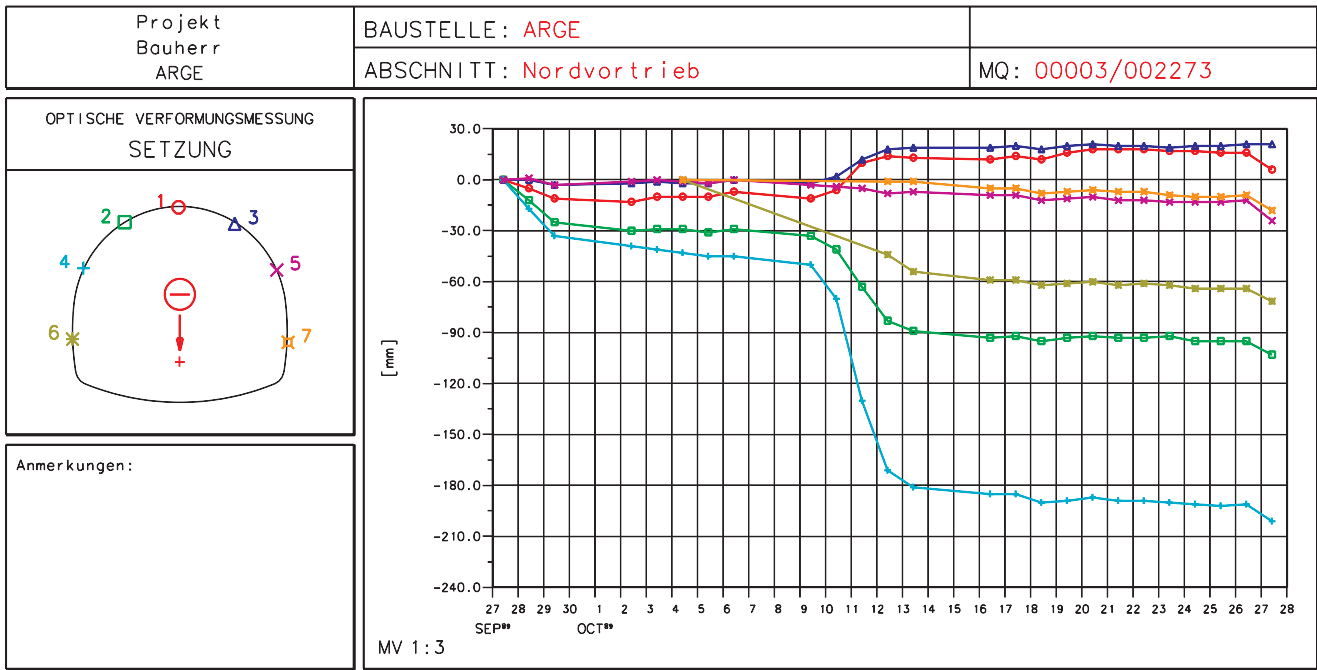


Abb. 2: Zeit-Setzungsentwicklung aller Punkte des Messquerschnitts 3

diger (Plausibilitätsmaße) sind, wird die CF-Methode als geeigneter Lösungsansatz erachtet.

Um diese nun anzuwenden, werden zunächst Symptome und Gegenhinweise als Prämissen von Regeln eingeführt. Die CFs der drei möglichen, unterschiedlichen Prämissen (Hebung, Setzung, weder noch) seien allesamt gleich 1 ( $cf_1 = cf_2 = cf_3 = 1$ ). Damit wird, auch mangels näheren Wissens über die Qualität der individuellen Messungen, vereinfachend festgelegt, dass jede Prämisse für die Interpretation als *gleichwertig* und auch als *zutreffend* gelten soll (»eine auffällige Setzungszunahme ist ein zutreffendes Symptom«, »eine auffällige Hebung ist ein zutreffender Gegenhinweis«, »eine unauffällige Messung ist ein zutreffender Gegenhinweis«).

Weiter werden drei initiale CFs  $cr_1$ ,  $cr_2$  und  $cr_3$  für die folgenden drei Regeln intuitiv festgelegt und erläutert, wobei jede dieser Regeln nur einen bestimmten Typ der o. a. drei Prämissen aufweise:

A)  $cr_1 = 0.3 e^{-(bew\_diff)^2}$   
 CF der Konklusion:  $f_1 = cr_1 * cf_1 = cr_1$

Aus einem vorliegenden Symptom (einer auffälligen Setzungszunahme eines Punktes) kann mit der nicht konstanten Sicherheit  $cr_1$  auf die Ursache geschlossen werden.

**Interpretation:** Die heuristische Sicherheit des Schlusses ist maximal 0.3. Damit wird quasi behauptet, dass, wür-

de nur ein einziger Punkt gemessen sein und dieser das Symptom zeigen, der Hypothese noch relativ gering vertraut wird. Bei Vorliegen mehrere Symptome wird diese Sicherheit noch zusätzlich von einem Parameter  $bew\_diff$ , der die Abweichung der Stärke des Symptoms vom arithmetischen Mittel aller Symptomstärken beschreibt, abhängig gemacht. Diese Modellierung trägt intuitiv dem Aspekt der geforderten Größengleichheit der Setzungszunahmen Rechnung. Zur Berechnung der Stärke eines Symptoms wird der Betrag der Setzungszunahme anhand einer empirischen Bewertungsfunktion in einen Auffälligkeitswert im Intervall  $[0, \infty)$  übersetzt. Es wird damit von geometrischen Einheiten auf analysezielabhängige, einheitenlose Auffälligkeitswerte übergegangen. Tab. 1 zeigt für verschiedene Eingangswerte  $bew\_diff$  den sich ergebenden Wert  $cr_1$ . Der Parameter  $diff [mm]$  stellt den, in die einheitenlose Größe  $bew\_diff$  umgesetzten, geometrischen Wert der Abweichung einer Setzungszunahme vom arithmetischen Mittel aller Setzungszunahmen in Millimeter dar.

**Erläuterung der Tabelle:** Weicht die Setzungszunahme eines Punktes z. B. 5.6 mm vom Mittel aller anderen Setzungszunahmen ab, wobei nur Punkte zur Mittelbildung herangezogen werden, die tatsächlich eine Setzungszunahme aufweisen, so kann zufolge ihrer empirischen Bewertung von 0.8 nur noch mit einem CF von 0.16 auf die Ursache geschlossen werden. Eine Setzungszunahme, die bereits 21 mm vom Mittel abweicht, trägt nichts mehr bei.

Tab. 1: CFs  $cr_1$  bei unterschiedlichen Abweichungen  $bew\_diff$  der Symptomstärke vom Mittel aller Symptomstärken

<b><math>bew\_diff</math></b>	0	± 0.2	± 0.4	± 0.6	± 0.8	± 1.0	± 2.0	± 3.0
<b><math>diff [mm]</math></b>	0	± 1.4	± 2.8	± 4.2	± 5.6	± 7.0	± 14.0	± 21.0
<b><math>cr_1</math></b>	0.3	0.29	0.25	0.21	0.16	0.11	0.01	0.00

B)  $cr_2 = -0.1$

CF der Konklusion:  $f_2 = cr_2 * cf_2 = cr_2$

Aus einem unauffälligen Setzungsverlauf eines Punktes kann mit einer konstanten Sicherheit  $cr_2 = -0.1$  gegen die Ursache argumentiert werden.

**Interpretation:** Der Beitrag, den ein erwartetes aber nicht vorhandenes Symptom leistet, ist gering und konstant. Damit wird ausgedrückt, dass jeder unauffällige Setzungsverlauf als leicht irritierend in Bezug zur Hypothese betrachtet wird.

C)  $cr_3 = -0.5$

CF der Konklusion:  $f_3 = cr_3 * cf_3 = cr_3$

Aus einem gegensinnig auffälligen Setzungsverlauf (einer Hebung) eines Punktes kann mit der konstanten Sicherheit  $cr_3 = -0.5$  gegen die Ursache gestimmt werden.

**Interpretation:** Der Beitrag, den ein erwartetes aber das Gegenteil zeigende Symptom leistet, ist deutlich und konstant. Damit wird behauptet, dass jede Hebung als bereits erheblich irritierend in Bezug zur Hypothese eingestuft wird.

Unter Verwendung der Verknüpfungsvorschrift aus Abschnitt 3 ergibt sich für das vorliegende Beispiel eine errechnete Sicherheit der Ursache von 0.87. Demnach wird auf das Vorliegen einer fehlerhaften Standpunktshöhe mit eben dieser Sicherheit geschlossen. Wodurch diese verursacht sein könnte, ist aus den vorliegenden Daten nicht mehr weiter ableitbar. Da es sich im Beispiel um Letztmessungen handelt, muss natürlich auf die Möglichkeit realer Setzungen immer noch hingewiesen werden. Außerdem sind gemäß der in Abschnitt 2 beschriebenen Vorgehensweise laut Schritt 10 auch noch andere mögliche Ursachen abzuarbeiten, von denen, wenn auch ursprünglich nicht vermutet, die eine oder andere einen noch höheren Sicherheitsfaktor ergeben könnte.

Das mit der CF-Methode zufolge des gewählten Ansatzes errechnete Ergebnis kann hinsichtlich seiner Korrektheit demnach nicht überprüft werden. De facto kann zur Qualitätsbeurteilung nur die intuitive Einschätzung des Analysefalls durch einen qualifizierten Experten gegenübergestellt werden. Beurteilt dieser die Situation ähnlich, arbeitet die Methode zufriedenstellend. Dabei ist immer davon auszugehen, dass keine anderen als die gezeigten Daten zur Verfügung stehen. Die vorab zu wählenden initialen CFs stellen in diesem Zusammenhang Tuningparameter dar, mit denen das Ergebnis an die menschliche Expertise angepasst werden kann. Im Folgenden werden einige Analysefälle simuliert und der Leser wird aufgefordert, seine Einschätzung der Fälle mit den Ergebnissen der Methode zu vergleichen. Gefragt wird wieder nach der Sicherheit der Aussage: »Es liegt am 27.10. ein systematischer Fehler in der Standpunktshöhe

Tab. 2: Resultierende Certainty-Factors zu den Analysefällen der Abb. 3–8

Abbildung	3	4	5	6	7	8
CF	0.92	0.87	0.79	0.32	-0.23	0.56

vor«. Die Beurteilung der Situation durch die Methode erfolgt exakt an diesem Tag. Dem Leser sollen allerdings auch die weiteren (späteren) Messungen, die zum Zeitpunkt der Analyse eigentlich noch nicht vorlagen, gezeigt werden. Tab. 2 listet die errechneten CFs für diese Hypothese bzgl. der in den Abb. 3 bis 8 dargestellten Setzungsverläufe auf.

## 6 Schlussfolgerung

Die Autoren meinen, dass man in den Fällen, die in den Abb. 3, 4 und 5 dargestellt sind, mit ziemlicher Sicherheit auf das Vorliegen einer fehlerhaften Standpunktshöhe schließen kann. Vermutlich liefert schon ein CF = 0,7 eine relativ hohe Sicherheit für das Vorhandensein dieses Fehlers. Durch eine Verfeinerung der Methode sollten die Resultate noch weiter abgesichert werden. Wie anhand dieses Beispiels und weiterer Untersuchungen (Chmelina 2002) aufgezeigt, haben wissenschaftliche Techniken und Methoden, insbesondere der Einsatz heuristischer CFs, ein vielversprechendes Potential für die Erstellung »intelligenter« Werkzeuge zur Unterstützung der Analyse von Deformationsmessungen im Tunnelbau. Nach dem beschriebenen Ansatz bekommt der Experte vor Ort so zwar keine »sicheren Bestätigungen« für ein vorliegendes Ereignis, kann jedoch auf ein solches automatisch aufmerksam gemacht werden und sich in seinen Vermutungen dann noch bestätigen lassen. Wenn man sich die Komplexität seiner Aufgabenfelder vor Ort vorstellt, so wird schnell klar, dass derlei Bestätigungen bereits eine erhebliche Unterstützung darstellen. Ein besonderer Vorteil ist außerdem, dass mit dem Verfahren Beurteilungswissen an andere Experten weitergegeben werden kann. Für eine weitergehende Erörterung der Materie sei auf Chmelina (2002) verwiesen.

### Literatur

- Chmelina, K.: Wissensbasierte Analyse von Verschiebungsdaten im Tunnelbau, Dissertation, Inst. für Geodäsie und Geophysik, TU Wien, 2002.
- Bonissone, P., Decker, K.: 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.
- Buchanan, B.G., Shortliffe, E.H.: Rule Based Expert Systems: The MYCIN Experiments of the Stanford Heuristic Programming Project. Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Reading, MA, 1984.
- Müller, L., Fecker, E.: Grundgedanken und Grundsätze der »Neuen Österreichischen Tunnelbauweise«. Clausthal, Trans Tech Publications, 1978
- Shapiro, St. C.: Encyclopedia of Artificial Intelligence. John Wiley & Sons, Inc. Publishers – New York, 2nd edition, 1992.

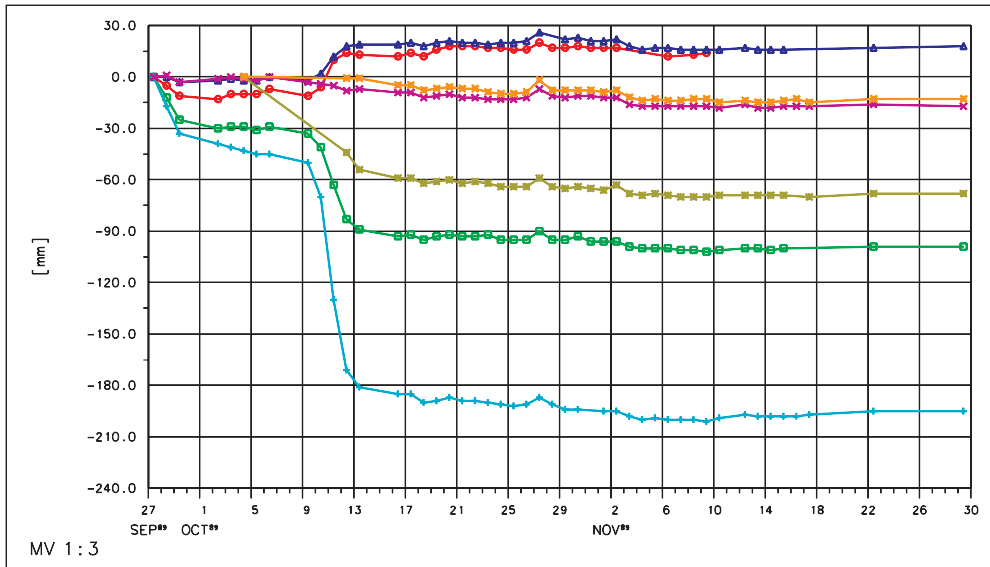


Abb. 3: Gleichgerichtete und größengleiche Fehlersystematik

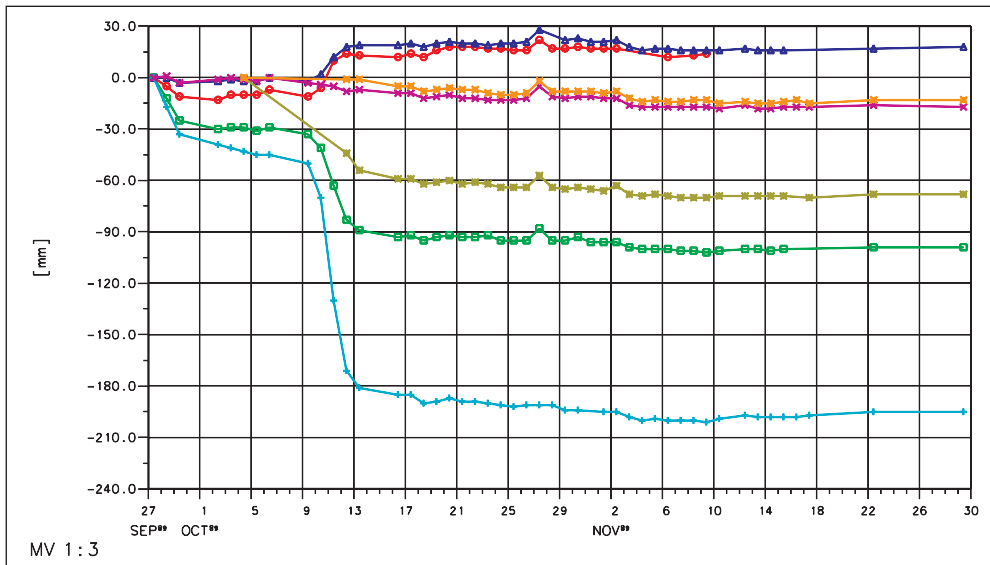


Abb. 4: Mit einer Ausnahme (Pkt. 4) gleichgerichtete und größengleiche Fehlersystematik

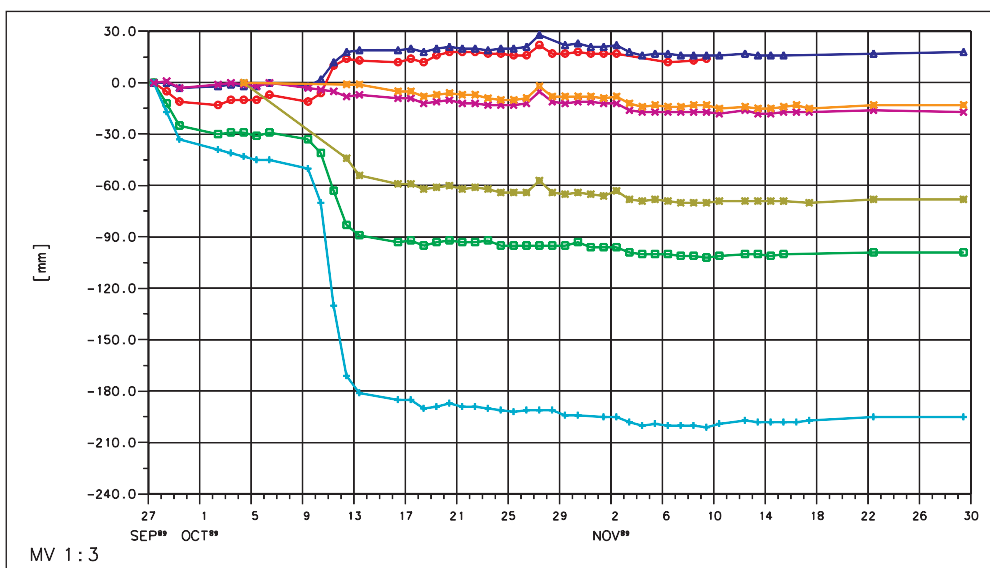


Abb. 5: Bis auf zwei Ausnahmen gleichgerichtete und größengleiche Fehlersystematik

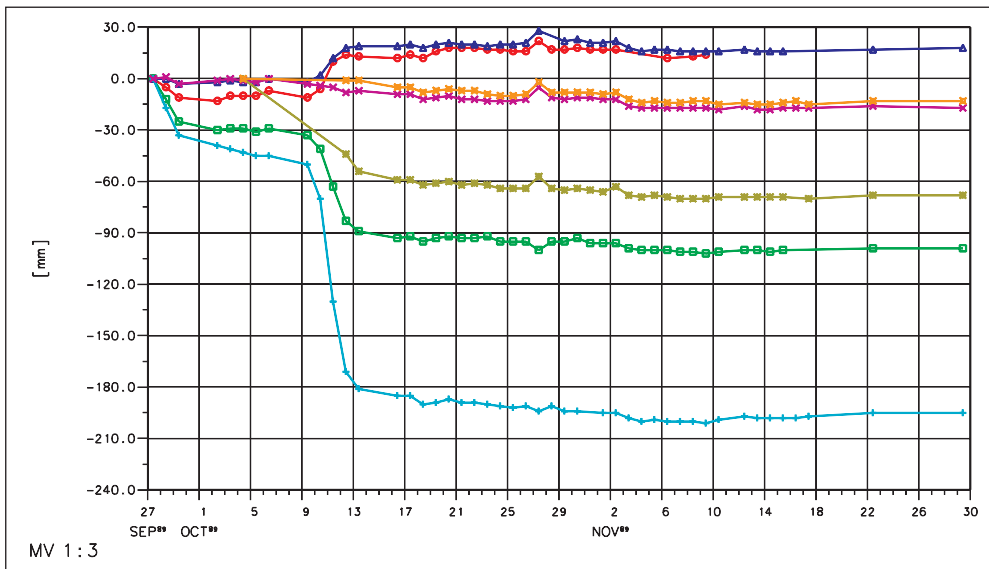


Abb. 6: Größengleiche Fehlersystematik in beiden Richtungen

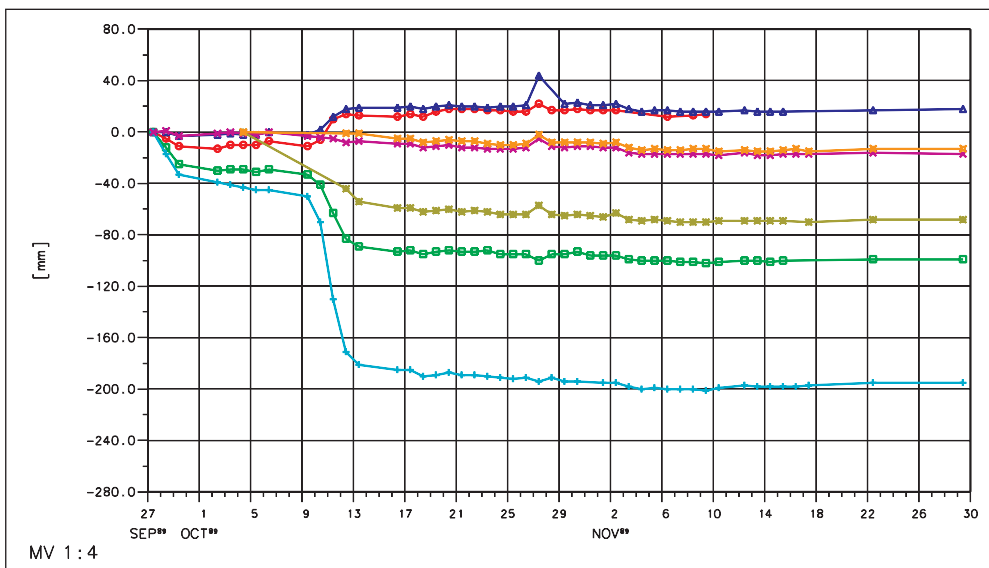


Abb. 7: Bis auf eine Ausnahme größengleiche Fehlersystematik in beiden Richtungen

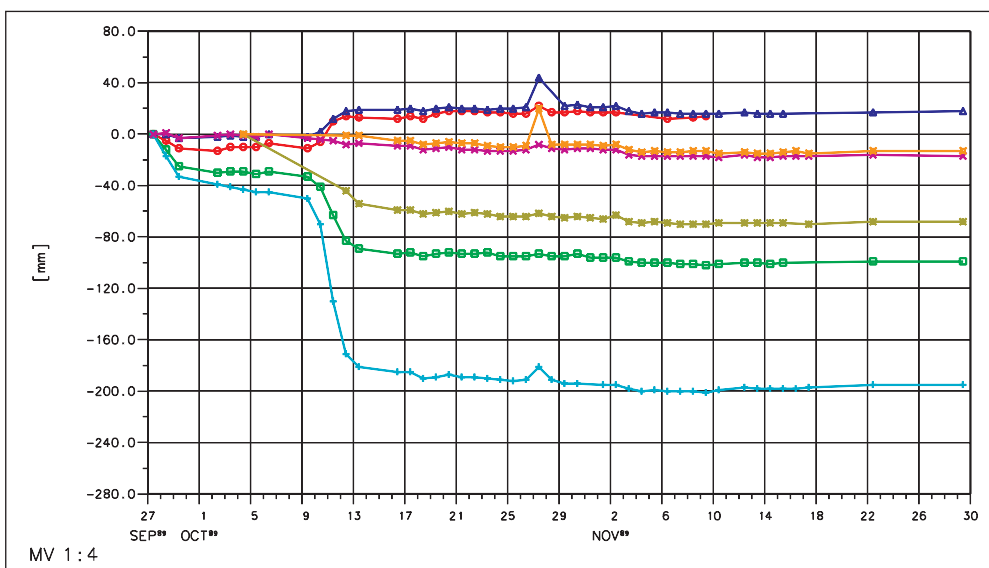


Abb. 8: Gleichgerichtete aber nicht größengleiche Fehlersystematik

Anschrift der Autoren  
 Dipl.-Ing. Dr. Klaus Chmelina  
 Geodata ZT GmbH Wien  
 Geyschlägergasse 14  
 A-1150 Wien  
 Tel.: +43 1 7863020 410  
 chmelina@geodata.at  
<http://www.geodata.at>

O. Univ. Prof. Dr. Heribert  
 Kahmen  
 Institut für Geodäsie und  
 Geophysik, Abt. für  
 Angewandte Geodäsie und  
 Ingenieurgeodäsie, TU Wien  
 Gusshausstrasse 27-29  
 A-1040 Wien  
 Tel.: +43 1 58801 12804  
 hkahmen@pop.tuwien.ac.at  
<http://info.tuwien.ac.at/ingeo>

O. Univ. Prof. Dr. Thomas  
 Eiter und  
 Ao. Univ. Prof. Dr. Uwe Egly  
 Institut für Informations-  
 systeme, Abt. für Wissens-  
 basierte Systeme, TU Wien  
 Favoritenstrasse 9-11  
 A-1040 Wien  
 Tel.: +43 1 58801 18460  
 eiter@kr.tuwien.ac.at  
 uwe@kr.tuwien.ac.at  
<http://www.kr.tuwien.ac.at>