

**Wissensbasierte Analyse von
Verschiebungsdaten im Tunnelbau**

von

Klaus Chmelina

**Veröffentlichung des Instituts für
Geodäsie und Geophysik
Abteilung Angewandte Geodäsie
und Ingenieurgeodäsie 128/3**

**Wissensbasierte Analyse von
Verschiebungsdaten im Tunnelbau**

von

Klaus Chmelina

**Veröffentlichung des Instituts für
Geodäsie und Geophysik
Abteilung Angewandte Geodäsie
und Ingenieurgeodäsie 128/3**

Herausgeber und Verleger: o.Univ.Prof.Dr.-Ing. Heribert Kahmen
Vorstand des Institutes für Geodäsie und Geophysik
Der Technischen Universität Wien
A-1040 Wien, Gusshausstrasse 27-29

Diese Arbeit wurde an der Technisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Technischen Universität Wien zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der technischen Wissenschaften eingereicht.

Die Kosten für den Druck wurden aus der ordentlichen Dotation des Institutes und der Unterstützung der Bank Austria Creditanstalt getragen.

Referent: o.Univ.Prof. Dr.-Ing. Heribert Kahmen
Koreferent: o.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. Thomas Eiter
Tag der mündlichen Prüfung: 7. November 2002

Druck: KOPIE, A-1090 Wien
Auflage 70 Stück

KURZFASSUNG

Im Zuge der Herstellung untertägiger Hohlraumbauten (Tunnel, Stollen, Kavernen) werden heute bereits standardmäßig geodätische Mess- und Auswertetechniken zur Ermittlung von Verschiebungen des Gebirges und/oder von Bauwerksteilen eingesetzt. Insbesondere bei Anwendung der NÖT (Neue Österreichische Tunnelbaumethode) haben diese Techniken eine große Bedeutung in Zusammenhang mit der Sicherheit und Wirtschaftlichkeit von Bauvorhaben erlangt. Die projektbegleitende geotechnische Interpretation der auftretenden Verschiebungen stellt eine verantwortungsvolle Aufgabe dar und ist daher qualifizierten Experten vorbehalten. Für die Vornahme dieser Tätigkeit ist umfangreiches Wissen verschiedener Art nötig. Die aktuelle Vorgangsweise, wonach auf Basis von Diagrammdarstellungen und sonstiger Grafiken und Listen Verschiebungen beurteilt werden, ist arbeitsintensiv und stößt zufolge der fortschreitenden technischen Entwicklung im Bereich der Messtechnik an organisatorische Grenzen; insbesondere, wenn es gilt, die Daten automatischer Messsysteme zeitnah zu interpretieren.

In dieser Dissertation wird ein Prototyp eines wissensbasierten Systems zur automatischen Analyse von Verschiebungsdaten entwickelt. Er stellt ein Unterstützungswerkzeug dar, welches eine Teilaufgabe der geotechnischen Interpretation, konkret das Erkennen von Auffälligkeiten in den Verschiebungsdaten, leistet. Das für diesen Zweck nötige Wissen wird in der Arbeit untersucht und strukturiert. Es wird als unsicheres, empirisches, vielfach auch intuitives und subjektives Wissen charakterisiert. Kennzeichnend für die zugrundeliegenden Verschiebungsdaten und auch weiterer in den Interpretationsprozess einzubeziehender Sekundärdaten ist deren Ungenauigkeit, Fehlerhaftigkeit und Unvollständigkeit, generell deren Heterogenität.

Aufgrund dieser Voraussetzungen wird ein heuristischer, datengetriebener und regelbasierter Ansatz zur Problemlösung verfolgt, bei dem die Verschiebungsdaten sowie weitere relevante Zusatzdaten zunächst als Fakten repräsentiert werden. Diese werden unter Nutzung projektbezogener Wissens bewertet. Mittels Regeln wird das Problemlösungswissen formuliert. Im Rahmen der Arbeit wurde dieses für drei ausgewählte Analyseaspekte implementiert. Diese bilden das Erkennen einer auffälligen Geschwindigkeitszunahme von Verschiebungen unter Berücksichtigung des Baufortschritts, das Erkennen auffälliger Verschiebungen auf Basis von Prognose- bzw. Erwartungswissen und das Erkennen eines systematischen Fehlers in den Ausgangsdaten.

Experimente mit tatsächlichen und simulierten Daten erproben abschließend die Leistungsfähigkeit der entwickelten Methoden.

ABSTRACT

The geodetic monitoring of 3d-displacements during tunnel excavation has become a standard procedure in nowadays tunnel projects and especially in NATM-projects (New Austrian Tunnelling Method). The daily geotechnical interpretation of the observed displacements is a responsible task requiring the specific knowledge of qualified and experienced geotechnical experts on site.

Currently interpretation work is mainly based on the analysis of numerous and different types of displacement diagrams together with diverse further data listings and graphics - a time consuming process. For a time-near analysis of bigger data volumes as well as for the monitoring data of the nowadays available automatic measuring systems this way-of-doing is already unpracticable.

In the thesis there is presented the prototype of a knowledge based system supposed to support this work by an automatic detection of remarkable displacements. The therefore necessary knowledge

is investigated and structured. It is described as insecure, empirical, often intuitive and subjective. For the monitoring data, but also for further data involved in the interpretation process, inaccuracies and errors have to be considered as well as their general heterogeneity.

Due to these preconditions a purely heuristic, data-driven and rule-based system-concept is developed. In the system the relevant data gets empirically rated according to user-defineable schemes (empirical rating models) and is then internally represented and stored as facts. The rating models allow to express (numerically and by associated linguistic variables) the degree of particularity, exceptionality or danger potential of the data related to specific interpretational aspects.

The relevant geotechnical knowledge is represented as heuristic rules. A forward-chaining inference process controls the activation of the rules causing them to fire on specific fact constellations (rating patterns). In the prototype three distinct interpretational aspects got implemented. These aspects are the detection of increasing displacement velocities and their relation to the excavation progress, the detection of remarkable displacements with respect to prognoses or expectations and the detection of a systematic error in the displacement data by use of a quantitative probabilistic reasoning method.

The performance of the prototype is tested with real and simulated data.

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als Universitätsassistent am Institut für Geodäsie und Geophysik, Abteilung für Angewandte Geodäsie und Ingenieurgeodäsie, TU-Wien sowie während eines Karenzjahres bei der Firma Geodata ZT GmbH im Rahmen des Projekts Wissenschaftler für die Wirtschaft.

Mein Dank gilt an erster Stelle meiner Frau Heidemarie. Ohne Unterstützung, Rückhalt und Ansporn von ihrer Seite hätte die Arbeit wohl zu keinem Ende gefunden. Nicht zuletzt verdanke ich ihr Unmengen an Vitaminen. Meinem zweijährigen Sohn Julian verdanke ich vergnügliche Zeiten der Ablenkung und des manchmal nötigen Abstands; mit ihm herumzubalgen war immer sehr entspannend. Obwohl, beim Wickeln musste er sich manchmal dennoch Vorträge anhören.

Zu weiterem Dank bin ich meinen Betreuern und Begutachtern verpflichtet. Herrn Prof. H. Kahmen, dem Leiter des genannten Instituts, für die Zeit, die er in unsere gemeinsamen Brainstorming-Runden investiert hat; Prof. T. Eiter, dem Leiter der Abteilung Wissensbasierte Systeme an der TU-Wien sowie Prof. U. Egly (ebendort), für den fachlichen Input aus ihren Wissensgebieten.

Weiters danke ich der Firma Geodata ZT GmbH für die Ermöglichung des Karenzjahres und die Bereitstellung von Projektdaten, ohne deren Verwendung nichts ausprobiert, nichts ausgesagt hätte werden können.

Den verschiedenen Experten danke ich für ihr Wissen.

INHALTSVERZEICHNIS

1. Einleitung	3
1.1 Problemstellung.....	3
1.2 Motivation und Ziele der Arbeit.....	4
1.3 Gliederung.....	5
2. Das Anwendungsgebiet	6
2.1 Die Neue Österreichische Tunnelbaumethode (NÖT).....	6
2.1.1 Geschichtliche Entwicklung.....	6
2.1.2 Definition und Grundsätze.....	6
2.1.3 Abgrenzung zu anderen Baumethoden.....	7
2.2 Kennzeichen einer NÖT – Baustelle.....	8
2.2.1 Beteiligte Parteien.....	8
2.2.2 Informationsaustausch.....	8
2.2.3 Beteiligte Experten.....	9
2.3 Die Geodätischen Verschiebungsmessungen.....	10
2.3.1 Anordnung der Messpunkte.....	10
2.3.2 Messablauf und Auswertung.....	11
2.3.3 Darstellungsformen und ihre Aussagekraft.....	12
2.3.4 Grenzen der Interpretation.....	17
2.4 Zusammenfassung.....	17
3. Wissensbasierte Systeme	18
3.1 Begriffsbestimmung, Charakterisierung.....	18
3.2 Anwendungsgebiete, Nutzen.....	19
3.3 Architektur eines Wissensbasierten Systems.....	20
3.4 Wissensarten.....	22
3.5 Wissensrepräsentation.....	24
3.6 Methoden der Wissensherleitung, Inferenzmethoden.....	29
3.7 Methoden der Wissenserhebung.....	33
3.8 Werkzeuge zum Bau Wissensbasierter Systeme.....	34
3.9 Die Eignung der Problemstellung und des Anwendungsumfelds für Entwicklung und Einsatz eines Wissensbasierten Systems.....	34
3.9.1 Beurteilung der als problematisch bewerteten Aspekte.....	36
3.9.2 Beurteilung der positiv bewerteten Aspekte.....	37
3.10 Zusammenfassung.....	40
4. Wissensbasierte Analyse Geodätischer Verschiebungsmessungen	41
4.1 Charakterisierung der Ausgangsdaten – Faktenwissen.....	41
4.1.1 Primäre Ausgangsdaten – Verschiebungsdaten.....	41
4.1.2 Sekundäre Ausgangsdaten.....	46
4.2 Zusammenfassende Bewertung der Ausgangsdaten.....	53

4.3 Charakterisierung des Analysewissens	54
4.4 Charakterisierung der Analyseziele	60
4.5 Charakterisierung der Analyseergebnisse	61
4.6 Zusammenfassende Bewertung des Analysewissens	66
5. Entwicklung eines Software-Prototyps	67
5.1 Die Expertensystem – Entwicklungsumgebung CLIPS	67
5.1.1 Merkmale, Komponenten und Module von CLIPS	67
5.1.2 Wissensrepräsentationen in CLIPS	69
5.1.3 Weitere Konstrukte und Befehle der CLIPS-Umgebung	73
5.1.4 Aufbau und Ablauf eines CLIPS-Hauptprogramms	74
5.2 Beschreibung des Software-Prototyps	75
5.2.1 Verwendungsparadigma	75
5.2.2 Benutzerschnittstelle	75
5.2.3 Architektur und Komponenten	77
5.3 Repräsentation der primären Ausgangsdaten	78
5.4 Repräsentationen sekundärer Ausgangsdaten	80
5.5 Repräsentationen und Anwendungen des Analysewissens	81
5.5.1 Öffentliches, projektunabhängiges Fachwissen	81
5.5.2 Öffentliches, projektspezifisches Fachwissen	86
5.5.3 Nichtöffentliches, persönliches Fachwissen	94
5.5.4 Nichtöffentliches, persönliches Metawissen	102
5.6 Zusammenfassung	103
6. Auswertebeispiele, Test des Prototyps	106
6.1 Erkennen einer auffälligen Geschwindigkeitszunahme und ihrer Relation zum Baufortschritt	106
6.2 Analysen auf Basis von Prognosen und Erwartungen	111
6.3 Erkennen eines Fehlers mittels Unsicheren Schließens	119
6.4 Anmerkungen zu den Tests	129
7. Schlussfolgerungen und Ausblick	131
Literaturverzeichnis	136
Lebenslauf	141

1. Einleitung

1.1 Problemstellung

Im Verlauf eines Tunnelbauprojekts wird während des häufig mehrjährigen Vortriebs eine große Menge an Mess- und Sachdaten unterschiedlicher Fachbereiche auf der Baustelle erfasst. Diese Daten dienen einerseits der Dokumentation des Projekts, andererseits verfolgen kompetente Fachleute mit der Aufbereitung und nachfolgenden Interpretation der Daten das Ziel, die von ihnen zu entscheidenden oder zu empfehlenden, den weiteren Bauablauf steuernden Maßnahmen zu erarbeiten. Von großer Bedeutung hierfür ist insbesondere die Interpretation geologischer, geotechnischer und geophysikalischer Daten als Grundlage für die Festlegung stütz-, sicherungs- und ausbautechnischer Maßnahmen zur Gewährleistung eines technisch sicheren und wirtschaftlich erfolgreichen Baufortschritts. Wesentliche Voraussetzungen für deren sinnvolle Festlegung sind die Verfügbarkeit qualitativ hochwertiger, problemorientiert aufbereiteter Daten der angeführten geowissenschaftlichen Fachbereiche sowie auch in diesen Bereichen erfahrener Spezialisten. Speziell bei der Anwendung semi-empirischer Tunnelbaukonzepte wie z.B. der NÖT (Neue Österreichische Tunnelbaumethode), bei denen die beteiligten Experten täglich und im Falle kritischer Situationen sehr rasch Entscheidungen zu treffen haben, wird dem Prozess der Dateninterpretation naturgemäß eine besondere Bedeutung beigemessen.

In diesem Zusammenhang bilden heute auch geodätische Verschiebungsmessdaten eine wesentliche Entscheidungsgrundlage. Dem aktuellen Stand der Technik entsprechend werden für die Erfassung dieser Daten motorisierte Tachymeter hoher Genauigkeit eingesetzt. Es werden mit ihnen manuelle oder automatische Messungen zu an der Tunnelwand fest installierten, in regelmäßigen Abständen angeordneten Spezialprismen ausgeführt (Abb. 1). Die epochenweise Auswertung der absoluten Koordinaten der einzelnen Messpunkte erfolgt unter Anwendung bekannter geodätischer Methoden (Netzausgleich, Freie Stationierung, Polaraufnahme).

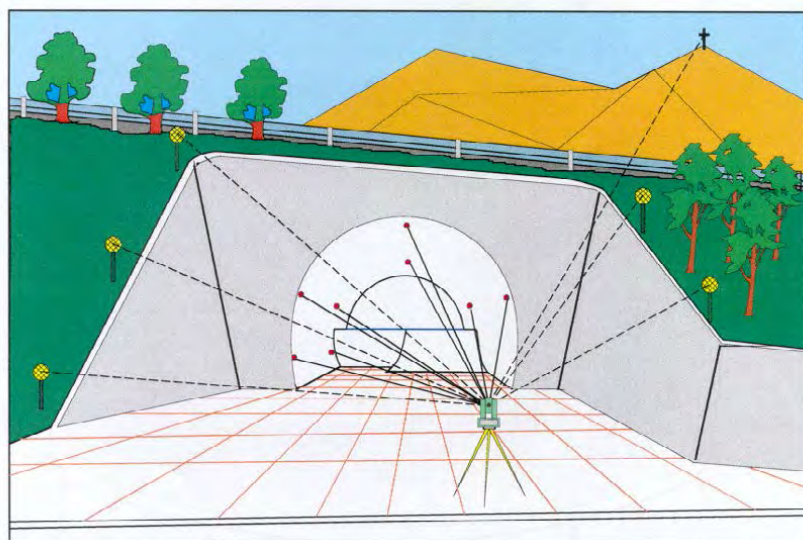


Abb. 1: Typische Beobachtungsszene vor dem Tunnelportal

Gegenwärtig stehen für die Erfassung, Auswertung und Darstellung dieser Daten mehrere sowohl ausgereifte als auch noch im Entwicklungsstadium befindliche Systeme unterschiedlicher Anbieter im Einsatz (z.B. STRESS, DEDALOS, ARGUS, DEST, BAGIS). Dennoch beschränken sich bislang die derzeitigen Möglichkeiten dieser Systeme auf die Erstellung zahlreicher mehr oder weniger hilfreicher, fachbezogener Graphiken, Diagramme und Listen. Die programmunterstützte Datenverarbeitung endet also mit der Visualisierung von Ergebnissen. Aufbauend auf deren Analyse hat der zuständige geotechnische Fachmann dann unter oftmals erheblichem Zeitbedarf mitunter komplexe Aufgaben wie z.B. das Erkennen kritischer zeitlicher oder räumlicher Verformungsverläufe, von Änderungen des Verformungstrends oder von Ursachen, Zusammenhängen und Auswirkungen zu lösen. Für die Bewältigung dieser Aufgaben sind Erfahrung und fachspezifisches Wissen nötig. Beides ist bei den verantwortlichen Fachleuten auf Baustellen naturgemäß verschieden stark, manchmal auch in nicht ausreichendem Maße, vorhanden. Hilfsmittel zur Unterstützung oder Automatisierung der Problemlösung fehlen bislang.

Aufgrund der ständig steigenden Informationsdichte wird es für Experten dabei zunehmend schwieriger und zeitaufwändiger, aus der großen Menge an Daten die für sie wirklich wesentlichen Informationen herauszuarbeiten. Wichtiges von weniger Wichtigem zu trennen nimmt bereits eine unangenehm lange Zeit in Anspruch und droht daher, ein rasches Reagieren zu verzögern.

Wegen der Beeinträchtigungen des Bauablaufs im Falle manuell durchgeführter Messungen werden typischerweise heute immer noch alle im unmittelbaren Vortriebsbereich befindlichen Messpunkte nicht öfters als einmal täglich beobachtet. Demzufolge können rasch ablaufende oder plötzlich auftretende Verformungsvorgänge oftmals nur sehr spät erkannt werden. Kürzere Messintervalle wären daher wünschenswert und sind heute unter Verwendung automatischer Messsysteme ohne Störung des Baugeschehens durchaus realisierbar. Deren Einsatz wirft allerdings die zentrale Frage auf, mit welchen Mitteln und Methoden eine „intelligente“, automatische und zeitnahe Analyse der anfallenden Daten dann bewerkstelligt werden könnte. Ein Werkzeug zur wirkungsvollen Unterstützung bzw. Entlastung des Experten scheint für diese Aufgabe dann notwendig.

1.2 Motivation und Ziele der Arbeit

Motiviert wird die vorliegende Arbeit durch die oben angeführten Probleme und das gegenwärtige Fehlen der erwähnten Mitteln und Methoden. Das Hauptziel der Arbeit ist es, ein wissensbasiertes System zu entwickeln, mit dessen Hilfe eine weitgehend automatische Analyse der Verschiebungsdaten durchgeführt werden kann.

Der Einsatz eines wissensbasierten Systems bietet den Vorteil, dass das zugrundeliegende Wissen auch nach der Systementwicklung verhältnismäßig einfach verändert oder erweitert werden kann. Es ist als unabhängiger Bestandteil des Gesamtsystems zu sehen und nicht, wie in der prozeduralen Programmierung, fest im Programmcode integriert. Die praktischen Erfahrungen bei der Anwendung derartiger Systeme in technischen Bereichen zeigen, dass unter Beschränkung auf abgegrenzte Aufgabengebiete durchaus zufriedenstellende Ergebnisse erzielt werden können [74]. Die Diskussion der Eignung des vorliegenden Anwendungsgebietes für den Einsatz eines solchen Systems ist somit ebenfalls Ziel dieser Arbeit.

Das zu entwickelnde System soll in der Lage sein, „auffällige“ Verschiebungsvorgänge automatisch zu erkennen und in geeigneter Form auszugeben. Ausgangsdaten bilden einerseits die bereits ausgewerteten absoluten Koordinaten der Messpunkte sowie weitere für die Analyse wichtige Zusatzdaten, welche automatisch über eine Schnittstelle dem System zugeführt werden sollen. Es ist also nötig, zunächst eine qualitative und quantitative Beschreibung dieser Daten vorzunehmen sowie das zur Lösung der beschriebenen Aufgabenstellung erforderliche Wissen und die von kompetenten Experten angewandten Strategien zur Anwendung dieses Wissens zu erarbeiten und geeignet zu repräsentieren.

Das im Rahmen dieser Arbeit konzipierte wissensbasierte System wurde speziell auf die Anforderungen des untertägigen Hohlraumbaus zugeschnitten und bis hin zu einem Software-Prototyp entwickelt. Das fachspezifische Wissen wird darin in Form von Fakten und heuristischen Regeln repräsentiert, wobei speziell auf die Verarbeitung unsicheren und unscharfen Wissens Bedacht genommen wurde. Wert und Nutzen des vorgestellten Konzepts hinsichtlich seiner tatsächlichen Einsetzbarkeit in der Praxis werden anhand der Auswertung umfangreicher Testdaten evaluiert.

1.3 Gliederung

Die Arbeit gliedert sich in sieben Kapitel. In *Kapitel 2* wird das Anwendungsgebiet - die Analyse geodätischer Verschiebungsmessungen im Tunnelbau nach der NÖT - samt seinem Umfeld beschrieben. *Kapitel 3* erläutert die zum Verständnis der Arbeit wesentlichen Grundlagen wissensbasierter Systeme und diskutiert die Eignung des Anwendungsgebiets für den Einsatz eines derartigen Systems. In *Kapitel 4* werden das Fakten- und Analysewissen im Anwendungsgebiet charakterisiert und bewertet. *Kapitel 5* widmet sich dem Konzept des entwickelten Systems, beschreibt den erstellten Software-Prototyp und die mit ihm möglichen Analysen. Die durchgeführten Testauswertungen werden in *Kapitel 6* vorgestellt und evaluiert. *Kapitel 7* schließt die Arbeit mit Schlussfolgerungen und Ausblicken ab.

2. Das Anwendungsgebiet

2.1 Die Neue Österreichische Tunnelbaumethode (NÖT)

2.1.1 Geschichtliche Entwicklung

Nahezu weltweit wird heute im konventionellen Tunnelbau die Neue Österreichische Tunnelbaumethode (engl.: New Austrian Tunneling Method – NATM) angewandt. Ihre ursprüngliche Entwicklung stützte sich auf felsmechanische Erkenntnisse und praktische Erfahrungen aus früheren Tunnelprojekten aus der Mitte des 20. Jahrhunderts. Ihre Grundsätze wurden von namhaften österreichischen Ingenieuren wie Rabcevic, Müller-Salzburg, Pacher u.a. begründet. Im Zuge der seither ständig fortschreitenden Entwicklung neuer Techniken und Methoden für die verschiedenen Phasen des Tunnelentwurfs ergaben sich laufend Verbesserungen der NÖT, insbesondere zur Bewältigung von Tunnelbauvorhaben unter immer schwierigeren geologischen und geotechnischen Randbedingungen. Zuzug der raschen internationalen Verbreitung erarbeitete die Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen im ÖIAV 1980 eine Zusammenstellung: *Neue Österreichische Tunnelbaumethode, Definition und Grundsätze*, deren wesentlichste Punkte nachfolgend beschrieben werden.

2.1.2 Definition und Grundsätze

Die NÖT folgt einem Konzept, welches das den Hohlraum umgebende Gebirge durch Aktivierung eines Gebirgstragringes zu einem tragenden Bauteil macht. Dabei müssen mehrere Grundsätze beachtet werden:

- Berücksichtigung des geomechanischen Gebirgsverhaltens,
- Vermeidung ungünstiger Spannungs- und Verformungszustände durch den zeitgerechten Einbau geeigneter Stützmaßnahmen,
- Rechtzeitiges Herstellen eines statisch wirksamen Sohlschlusses,
- Optimierung des Ausbauwiderstandes in Abhängigkeit von den zulässigen Deformationen,
- Messtechnische Überwachung

Die Methode verfolgt das Ziel, die auftretenden Spannungsumlagerungsvorgänge gesteuert und in möglichst wirtschaftlicher und technisch sicherer Weise ablaufen zu lassen. Zu den allgemeingültigen Richtlinien zählen hierfür im Wesentlichen:

- Schonendes Lösen des Gebirges,
- Wahl der Hohlraumform unter weitestgehender Anpassung an die felsmechanischen Gegebenheiten (Spannungen, Festigkeiten, ...),
- Anpassung der Bau- und Betriebsweise an die wechselnden Gebirgseigenschaften, an die Standzeit sowie an die Stabilität der Ortsbrust (Wahl der Angriffsflächen und -tiefen,...).

Kennzeichnend für die Methode ist vor allem ihre Flexibilität bei der Bewältigung der auftretenden Probleme insbesondere in Zusammenhang mit rasch wechselnden Untergrundverhältnissen oder

Hohlraumgeometrien. Sie greift hierzu auf drei wesentliche Konstruktionselemente, und zwar Spritzbeton, Anker und Stahlbögen zurück. Ihre erfolgreiche Umsetzung in die Baupraxis basiert auf dem Verständnis ihrer Grundsätze und der Kompetenz und Erfahrung der verantwortlich beteiligten Ingenieure. Da kein standardisiertes, wissenschaftlich fundiertes Regelwerk zur NÖT vorhanden ist, diese weitgehend nur über prinzipielle Grundsätze und Empfehlungen beschrieben wird (z.B. 21 Grundsätze von L. Müller), wird sie vielfach als eine semi-empirische Vorgehensphilosophie bezeichnet. Bezüglich der praktischen Umsetzbarkeit der Grundsätze kommt es international immer wieder zu Kritik und eklatanten Missverständnissen. Häufig werden daraus resultierende Schadensfälle ungerechtfertigterweise der Methode angelastet.

Integrierender Bestandteil der NÖT ist wie angeführt die laufende messtechnische und visuelle Überwachung des Gebirges und der Stützmittel während des Vortriebs. Sie dient dem Nachweis der Sicherheit, der Kontrolle der Vorbemessung und der endgültigen Bemessung der Stützmittel während der Bauphase, der Optimierung des Ausbauwiderstandes in Abhängigkeit von den „zulässigen“ Deformationen sowie der Optimierung der Bau- und Betriebsweise. Weiters ermöglicht sie auch unter Einschränkungen eine Prognose des Gebirgsverhaltens. Im Grunde stehen Messungen am Beginn (Vorerkundung) und am Ende (Langzeitmessungen) der Entwurfsphasen eines Tunnelprojekts (Abb. 2)

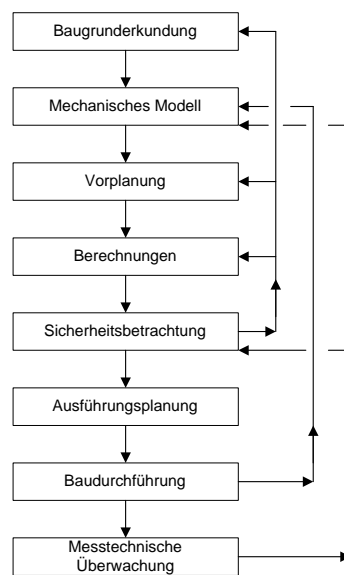


Abb. 2: Entwurfsphasen eines Tunnelprojekts nach der NÖT [3]

2.1.3 Abgrenzung zu anderen Baumethoden

Die Frage, worin sich die NÖT von anderen Baumethoden unterscheidet wird von oben angeführter Definition zunächst nicht beantwortet. Allgemein kann angegeben werden, dass z.B. Vortriebe ohne Sicherungsmittel, Schildvortriebe oder Rohrvortriebe nicht der NÖT zugeordnet werden. Einen umfassenden Überblick über Entwicklung, Grundlagen und Praxis der NÖT liefern [1, 14, 15, 23].

2.2 Kennzeichen einer NÖT - Baustelle

2.2.1 Beteiligte Parteien

Bei der Ausführung von Untertagebauwerken (Stollen, Tunnel, Kavernen) ist eine Vielzahl von Parteien involviert (Bauherr, Baufirma, Planer, Bauüberwachung, Geotechniker, Geologe, Sachverständige,...). In Abhängigkeit von der Projektart können unterschiedliche Konstellationen zwischen diesen Beteiligten auftreten. Die folgende Übersicht (Abb. 3) zeigt eine schematische Darstellung einer Konstellation von Beteiligten am Beispiel eines österreichischen Tunnelprojekts (Sieberg-Tunnel).

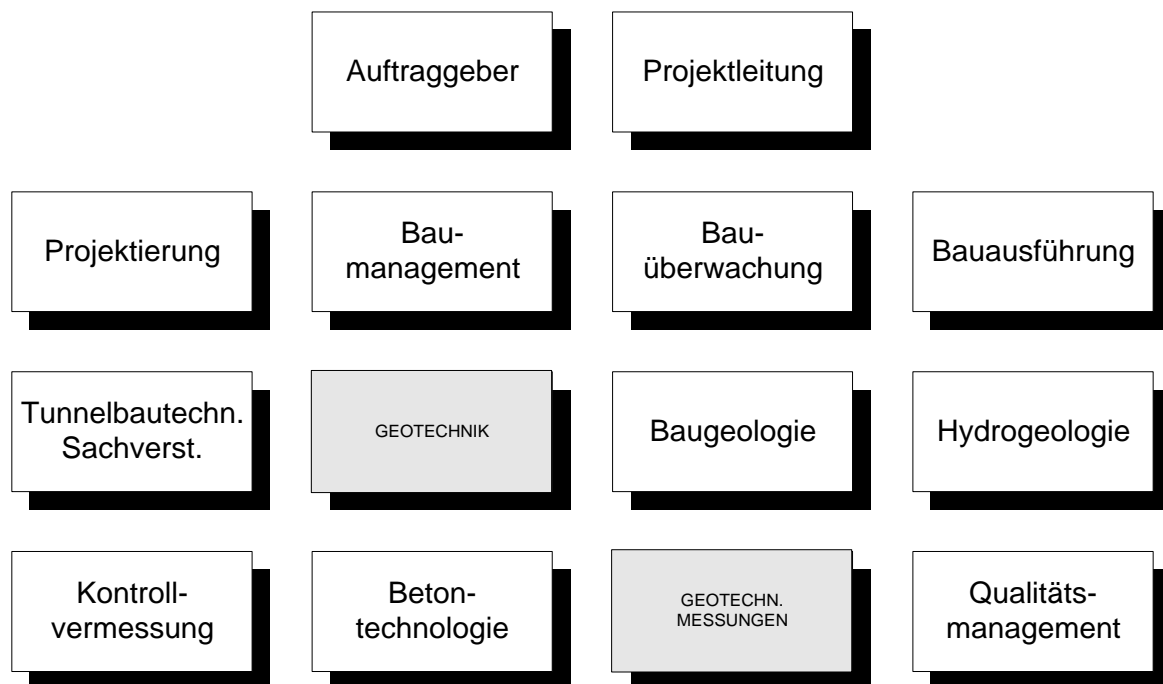


Abb. 3: Beteiligte Parteien eines Tunnelprojekts (Quelle: HLAG)

Jüngste Bauvorhaben zeigen, dass die Öffentlichkeit (Anrainer, Bürgerinitiativen, Umweltorganisationen) eine besondere, immer kritischer werdende Position einnimmt und deren Vertreter als externe Beteiligte mitzubersichtigen sind.

2.2.2 Informationsaustausch

Die Weitergabe von Informationen unter den Beteiligten erfolgt entsprechend ihrer jeweiligen Aufgabe und Position innerhalb der Organisationshierarchie eines Projekts in Form von schriftlichen oder mündlichen Anweisungen oder Berichterstattungen. Eine hervorzuhebende Kommunikationsplattform stellt in diesem Zusammenhang die regelmäßig anberaumte Baubesprechung dar. In ihr werden die aktuellen Belange des Baugeschehens unter Fachleuten diskutiert, Meinungen eingeholt und ausgetauscht und Entscheidungen u.a. auf Basis von Messergebnissen getroffen. Nachfolgende Abbildung (Abb. 4) zeigt schematisch den Informationsfluss unter den Beteiligten.

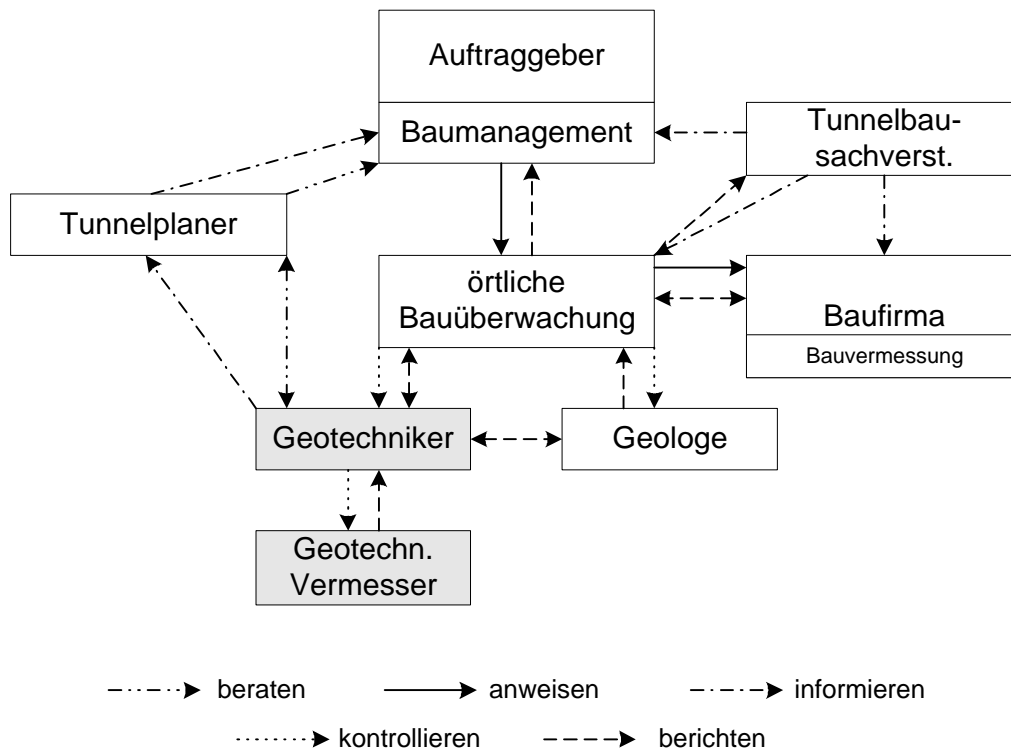


Abb.4: Informationsfluss unter den Beteiligten eines Tunnelprojekts (Quelle: HLAG)

2.2.3 Beteiligte Experten

Innerhalb der beteiligten Parteien sind eine Reihe von Fachleuten für die spezifischen organisatorischen, wirtschaftlichen und technischen Belange des Tunnelprojekts verantwortlich. Für die Bearbeitung tunnelbautechnischer Problemstellungen zuständig sind in weitestem Sinne Ingenieurgeologen, Hydrogeologen, Geophysiker sowie Experten des Bauingenieurwesens, tätig in den Bereichen Tunnelplanung, -bautechnik, -statik, Bauphysik, Grundbau- und Bodenmechanik, Felsmechanik, Baubetrieb, Bauwirtschaft, u.s.w. Der in Abb. 4 ersichtliche geotechnische Vermesser ist nun verantwortlich für die Ausführung und Auswertung der im folgenden Kapitel näher beschriebenen geodätischen Verschiebungsmessungen. Er berichtet laufend dem Geotechniker, d.h., er übergibt diesem regelmäßig die ausgewerteten Messdaten (Koordinaten, Diagramme). Dieser nimmt die Interpretation dieser Daten vor und weist den Vermesser an, d.h., er legt Art und Umfang des weiterhin auszuführenden geotechnischen Messprogramms fest. Ein reibungsloses Funktionieren dieser Schnittstelle ist Basis für die erfolgreiche geotechnische Betreuung einer NÖT - Tunnelbaustelle.

2.3 Die Geodätischen Verschiebungsmessungen

Die Ausführung ingenieurgeodätischer Messungen zur Ermittlung absoluter dreidimensionaler Verschiebungen untertägiger Messpunkte gewann in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung für den Tunnelbau nach der NÖT. Konvergenz- und andere Messungen werden zumindest seit vier Jahrzehnten systematisch im Tunnelbau angewandt. Jedoch erst seit Beginn der neunziger Jahre des vorigen Jahrhunderts konnten neue Entwicklungen im Vermessungswesen und in der Datenverarbeitung die Technik der Messdatengewinnung und deren Aussagekraft revolutionieren.

2.3.1 Anordnung der Messpunkte

Die eigentlichen Verschiebungsmesspunkte sind als Reflexfolien oder Miniprismen realisiert, welche mittels spezieller Adapter auf im Spritzbeton der Tunnelaussenschale installierte Konvergenzbolzen aufgeschraubt werden. Mehrere dieser Prismen werden jeweils zu in regelmäßigen Abständen angeordneten Messquerschnitten zusammengefasst (Abb. 5).



Abb.5: Anordnung von Messpunkten und Messquerschnitten im Tunnel

Die Dichte der Messquerschnitte - damit verbunden die Repräsentativität der Messergebnisse für bestimmte Gebirgsbereiche - und die Häufigkeit der Messungen werden zunächst in einem geotechnischen Messprogramm unter Beachtung des prognostizierten Gebirgsverhaltens festgelegt und im Verlauf des Vortriebs auf das tatsächliche Gebirgsverhalten und die zeitliche Entwicklung der Messergebnisse abgestimmt. Projektabhängig sind Messquerschnittsabstände von 10m (Wiener U-Bahnbau) bis 50m (Tunnelbauten in kompaktem Fels) typisch. Pro Querschnitt werden üblicherweise zwischen 3 und 7 Messpunkte in Abhängigkeit von der Querschnittsgröße und der Bauphaseneinteilung (z.B. Kalotte, Strosse, Sohle) installiert. Klassisch ist beispielsweise die Vermarkung eines Punktes in der Firste, je eines im linken und rechten Kämpfer sowie zweier weiterer im Strossenbereich.

2.3.2 Messablauf und Auswertung

Die am häufigsten angewandte Methode zur manuellen Messung der untertägigen Verschiebungsmesspunkte ist die Freie Stationierung. Sie hat sich aufgrund ihrer Flexibilität bei der Standpunktwahl im Tunnel weitgehend durchgesetzt. Ausgehend von Messungen der Horizontalwinkel, Vertikalwinkel und schrägen Seiten zu im rückwärtigen Bereich des Tunnels liegenden, koordinativ bekannten Referenzpunkten, welche sich über einen entsprechenden Zeitraum hinweg bereits als stabil erwiesen haben, lassen sich mit Hilfe der Ausgleichsrechnung die absoluten Koordinaten und die Orientierung des Standpunkts sowie deren Genauigkeitswerte bestimmen. Anschließend werden die im vorderen Tunnelbereich liegenden Neupunkte beobachtet (Abb. 6). Unter Ausnutzung der in modernen Tachymetersystemen heute integrierten Zusatzeinrichtungen (Servomotoren, automatische Zielfindung) können die Messzeiten kurz gehalten werden. Da die Auswertung der Punkte im absoluten Projektkoordinatensystem erfolgt, können auch alle weiteren Messaufgaben wie Vortriebssteuerung, Profilkontrolle sowie div. Absteckungen ausgehend von diesen Punkten flexibel erfolgen.

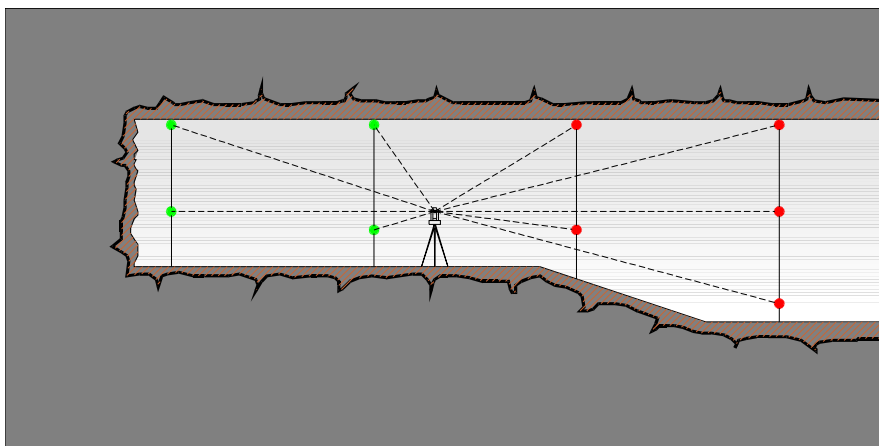


Abb. 6: Aufnahmesituation bei der Freien Stationierung

Moderne Messsysteme ermöglichen heute in Verbindung mit tunneltauglichen Steuercomputern speziell für den besonders bedeutsamen Vortriebsbereich eine kontinuierliche und vollautomatische Messung, Auswertung und graphische Darstellung der Verschiebungen. Derartige Systeme werden auf festen Konsolen an der Tunnelwand montiert (Abb. 7).



Abb. 7: Sensor und Steuereinheit zur automatischen Verschiebungsmessung

Unter Verwendung geodätischer Messausrüstung hoher Genauigkeit (Tachymeter, Prismen) und Einhaltung geometrischer Randbedingungen hinsichtlich der Beobachtungsanordnung (Messdistanzen, Punktconfiguration) können die Koordinaten der Messpunkte mit einer theoretischen Genauigkeit von $\pm 1\text{-}2\text{ mm}$ (einfache Standardabweichung) bestimmt werden. In der Praxis sind allerdings eine Reihe genauigkeitsmindernder Störeinflüsse zu berücksichtigen.

2.3.3 Darstellungsformen und ihre Aussagekraft

Nach erfolgter Auswertung liegen zunächst die absoluten, dreidimensionalen Projektkoordinaten der Verschiebungsmesspunkte in den einzelnen Messepochen vor. Für die Interpretation dieser Daten werden verschiedene graphische Darstellungsformen herangezogen. Im folgenden wird ein Überblick über Arten und Aussagekraft der Darstellungen gegeben [21].

1) Darstellung absoluter Verschiebungen

a) Zeit – Verschiebungskurven

In diesen Diagrammen werden die auf die Tunnelachse bezogenen Vertikal-, Horizontal- oder Längsverschiebungskomponenten einzelner Messpunkte oder deren Verschiebungsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Zeit aufgetragen. Üblicherweise werden alle Messpunkte eines Messquerschnitts gemeinsam in einem Diagramm gezeigt. Als zusätzliche Informationen werden am selben Blatt die Baufortschrittsdaten grafisch dargestellt (Abb. 8).

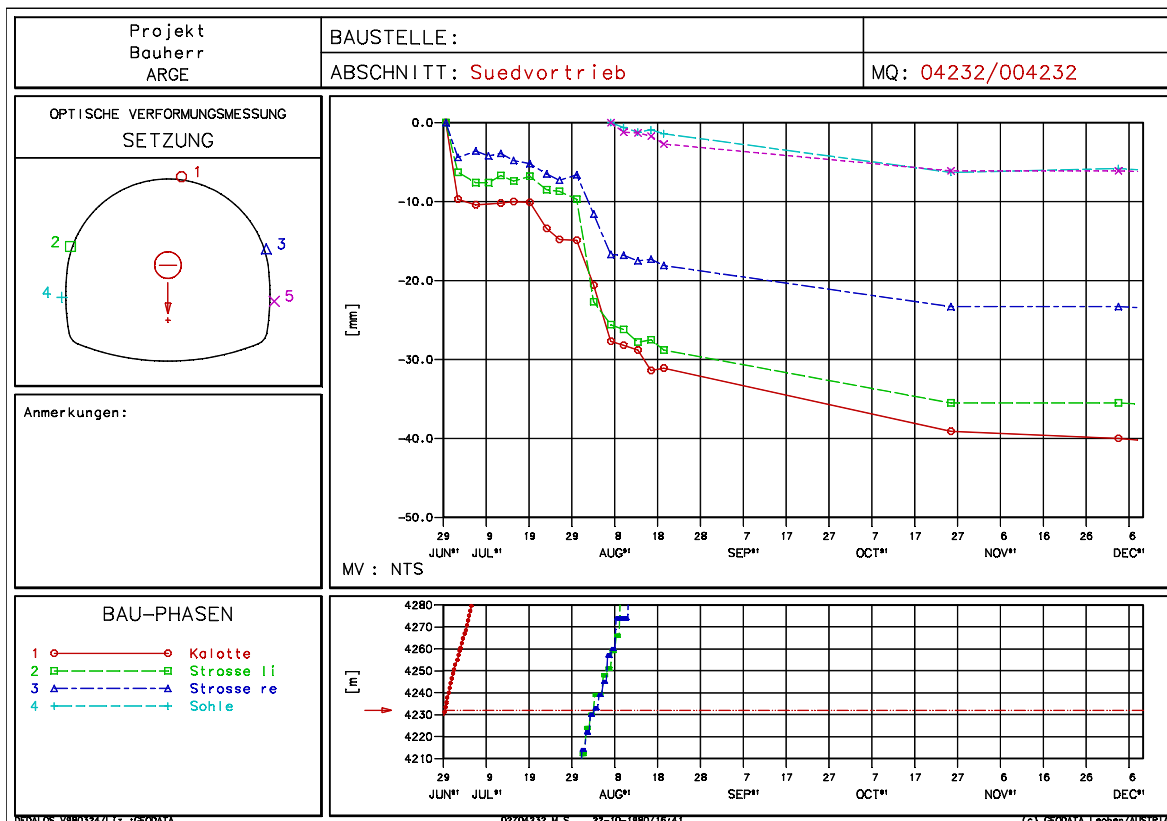


Abb. 8: Zeit-Setzungsdiagramm mit Darstellung des Baufortschritts

Aussagekraft:

Diese Darstellungsart eignet sich zur Überwachung des Spannungsumlagerungs- und Stabilisierungsprozesses. Bei einem mehr oder weniger gleichmäßigem Fortschritt des Vortriebs nimmt die Verformungsgeschwindigkeit kontinuierlich ab. Die Zeit – Verschiebungskurve muss sich also im Regelfall asymptotisch dem Endwert nähern. Abweichungen dieses Kurvenverlaufs können durch nachfolgende Bauvorgänge (z.B. Strossendurchgang in Abb. 8) oder eine Destabilisierung des Gebirges und/oder der Auskleidung ausgelöst werden. Treten ohne ersichtliche Ursachen gleichbleibende oder ansteigende Verschiebungsgeschwindigkeiten auf, so stellt dies ein Alarmzeichen dar. Desweiteren können aus diesen Diagrammen mit einiger Erfahrung Vorhersagen über die Endbeträge der Verschiebungen getroffen werden. Die prognostizierten Endverformungen dienen der Festlegung eines beim Ausbruch zu berücksichtigenden Übermaßes. Dieses soll nach Abklingen der Verschiebungen die Einhaltung des Lichtraumprofils gewährleisten.

b) Einflusslinien und Einflussflächen, Trendlinien und Trendflächen

Einflusslinien entstehen durch Verbindung (Spline-Interpolation) der zu gleichen Zeitpunkten erfassten Verschiebungskomponenten mehrerer auf einer gedachten Messlinie entlang der Tunnelachse angeordneter Punkte (z.B. First- oder Ulmenpunkte). Mehrere Messperioden können in einem Diagramm dargestellt werden. Es können sowohl Einzelkomponenten (Setzung, Quer-, Längsverschiebung) wie auch die Differenz oder der Quotient von Verschiebungskomponenten verschiedener Messpunkte aufgetragen werden. Einflussflächen stellen eine logische Weiterentwicklung der Einflusslinien dar, bei der alle Messpunkte eines gewählten Tunnelabschnitts herangezogen und die Verschiebungskomponenten zwischen diesen Punkten interpoliert werden. Als Darstellungsformen können Isoflächen an der Hohlraumlaibung oder deren Abwicklung in die Ebene gewählt werden. Trendlinien werden aus den Einflusslinien durch Abgreifen von Werten in einem festgelegten Abstand von der Ortsbrust oder zu einem bestimmten Zeitpunkt nach Vortriebsdurchgang ermittelt. Dies „normiert“ gewissermaßen die Darstellung der Einflusslinien, da zum Zeitpunkt der Nullmessung die Messpunkte baubedingt nicht immer den gleichen Abstand von der Ortsbrust aufweisen können (Abb. 9).

Aussagekraft:

Die vortriebsorientierte Darstellung von Einzelkomponenten bietet einen guten Überblick über das Verschiebungsgeschehen eines längeren Tunnelabschnitts. In einem Bereich mit weitgehend gleichmäßigem Gebirgsverhalten sind die einzelnen Einflusslinien in Form und Größe ähnlich. Eine Änderung des Gebirgsverhaltens zeigt sich durch eine Veränderung der Form der Einflusslinie, wodurch ein rasches Erkennen von Problemzonen ermöglicht wird. Eine Zu- oder Abnahme der Flächen zwischen den Einflusslinien weist auf eine Annäherung des Vortriebs an Gebirge mit unterschiedlichen Verformungseigenschaften hin, eine Zuordnung geologischer Strukturen zu den gemessenen Verschiebungswerten erleichtert das Erkennen lokaler Entspannungs- und Überlastungsvorgänge. Aus den Trendlinien können tendenzielle Änderungen im Verformungsverhalten des Systems Ausbau – Gebirge leichter erkannt werden als aus den ihnen zugrundeliegenden Einflusslinien. Darüber hinaus ermöglicht eine Extrapolation der Trendlinien über den Bereich der aktuellen Ortsbruststationierung hinaus Rückschlüsse auf das zu erwartende Gebirgsverhalten.

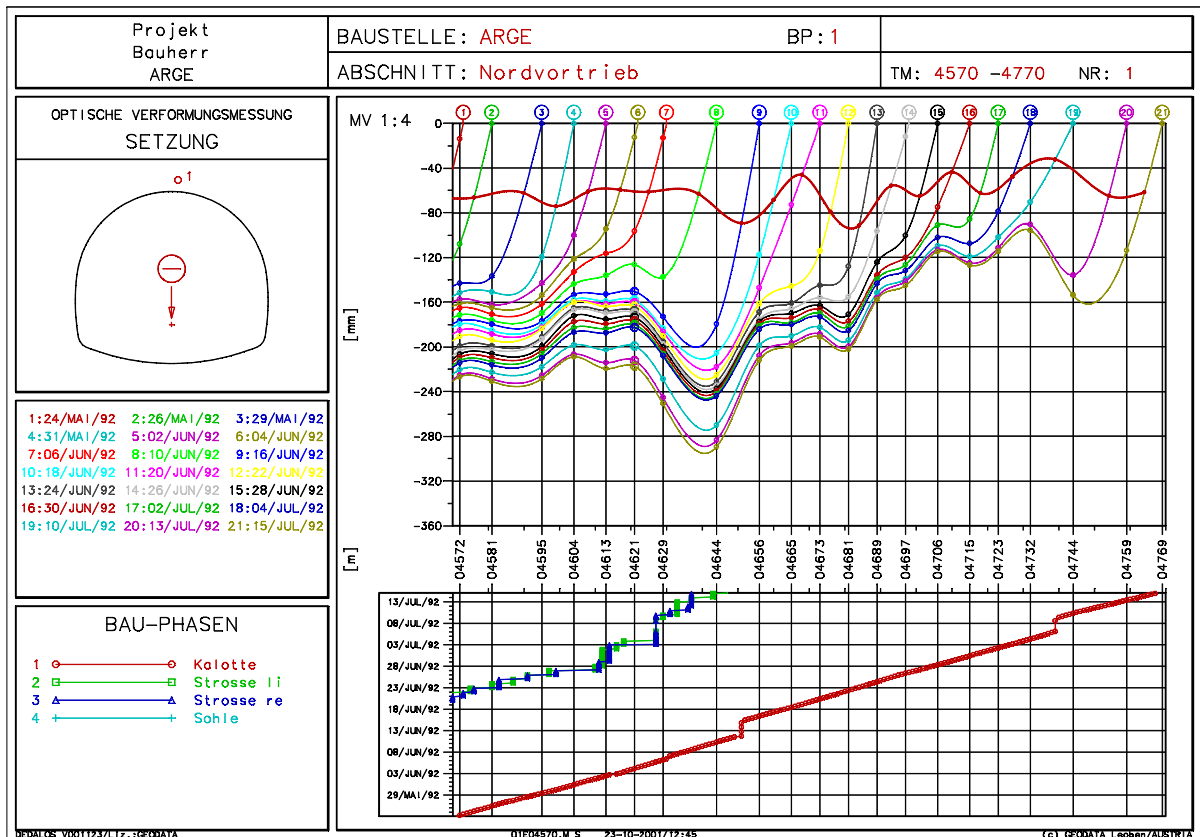


Abb. 9: Einflusslinien der Firstsetzung und Trendlinie 5m vor der Ortsbruststationierung

c) Querschnittsbezogene Verschiebungsvektoren

Bei dieser Darstellungsart werden die Setzungs- und Querverschiebungskomponenten der Punkte eines Messquerschnitts in einer Ebene normal zur Tunnelachse gezeigt.

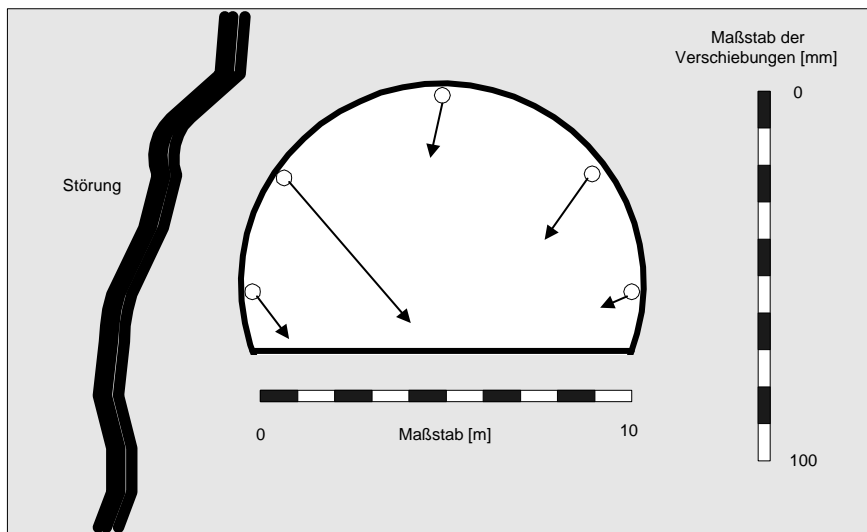


Abb. 10: Darstellung von Verschiebungsvektoren im Querschnitt

Aussagekraft:

Aus den Verschiebungsvektoren lassen sich Rückschlüsse auf die geologische Struktur ausserhalb des Tunnelquerschnitts ableiten. Insbesondere einseitig wirkende Überbeanspruchungen des Gebirges sind anhand sich einstellender asymmetrischer Verformungsbilder rasch erkennbar. Speziell im spitzen Winkel zur Tunnelachse streichende Störungen im Gebirge kündigen sich frühzeitig an (Abb. 10).

d) Räumliche Orientierung von Verschiebungsvektoren

Im sog. Lagekugeldiagramm werden die räumlichen Orientierungen der Verschiebungsvektoren eines oder mehrerer Messpunkte und ihre zeitlichen Veränderungen dargestellt. Hierfür werden epochenweise die aktuellen Durchstoßpunkte der Raumvektoren mit der Einheitskugel um den Messpunkt markiert und diese mittels Projektion (z.B. nach Lambert) verebnet. Zweckmäßigerweise werden wiederum pro Diagramm alle Punkte eines Messquerschnitts erfasst (Abb. 11).

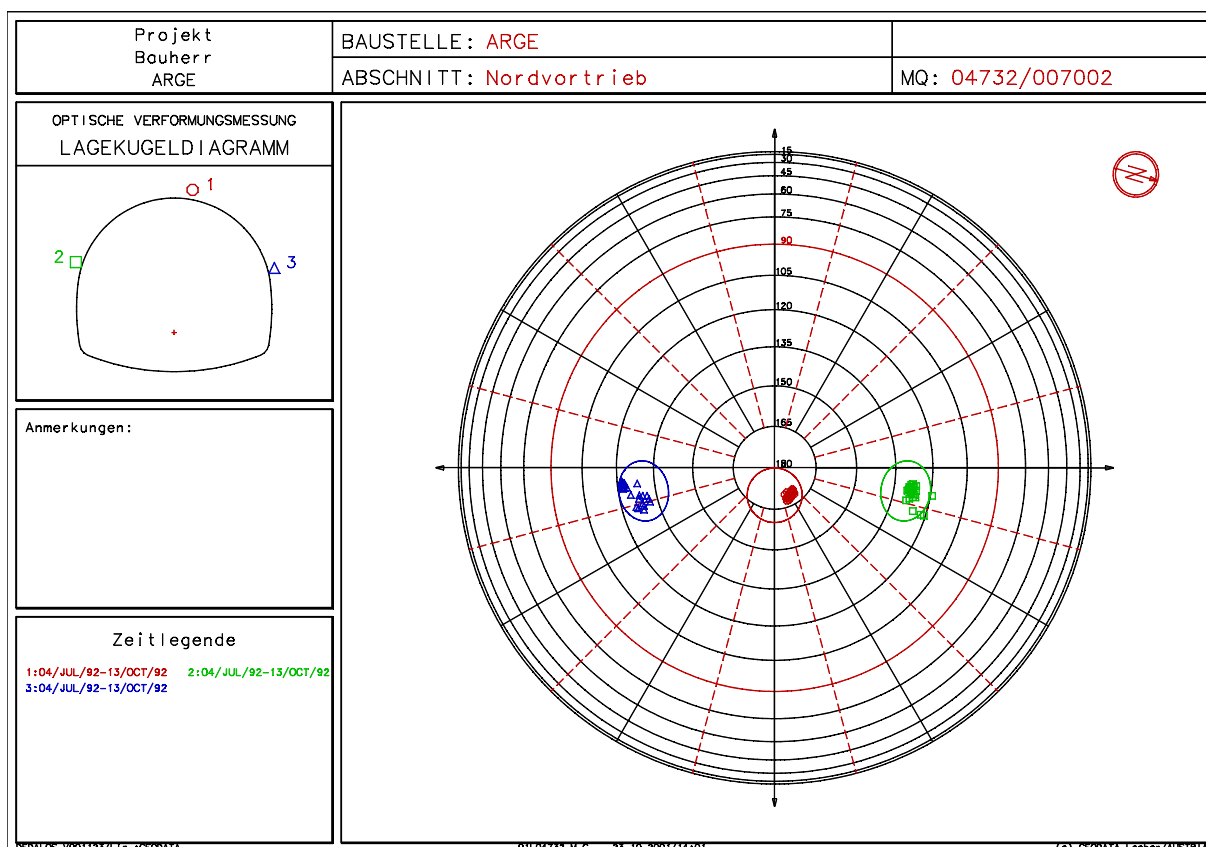


Abb. 11: Lagekugeldiagramm mit eingezeichneten Normalbereichen

Aussagekraft:

Die Vektororientierungen können Aufschluss über die räumliche Gebirgsstruktur geben. Ihre Änderungen sind oft ein Zeichen für die Annäherung des Vortriebs an eine Zone mit weicherem

oder steiferem Gebirge und stehen daher mit den geologischen Verhältnissen eng in Zusammenhang. Wird für einen Messpunkt ein bestimmter Bereich der Orientierungen als „Normalbereich“ definiert, wofür eine erwartete mittlere Orientierung und eine Toleranzgrenze festzulegen sind, kann die routinemäßige Kontrolle der Verschiebungssituation teilautomatisiert werden.

2) Darstellung relativer Verschiebungen

a) Verschiebungsdifferenzen

Bei dieser Art der Darstellung werden epochenweise die Differenzen einzelner absoluter Verschiebungskomponenten (Setzung, Querverschiebung, Längsverschiebung) zwischen zwei Messpunkten gebildet. Diese Differenzen können in Form von Zeit-Verschiebungskurven oder als Einfluss- bzw. Trendlinien aufgetragen werden. Als sinnvoll haben sich insbesondere Setzungsdifferenzen zwischen Firste und Ulm, den beiden Ulmen und bei Tunneln mit geringer Überlagerung auch zwischen Oberfläche und Firste herausgestellt.

Aussagekraft:

Die Setzung im Bereich der Firste ist im Regelfall größer als die Ulmsetzung. Hohe Differenzen weisen auf eine höhere Belastung der Firste hin, was speziell bei oberflächennahen Tunnelbauwerken als Warnsignal zu werten ist. Verschwindet hingegen die Differenz, zeigt dies eine sehr geringe Belastung oder aber eine schwache Verzahnung zwischen Schale und Gebirge an. In diesem Fall können im Bereich der Kalottenfüße hohe Lastkonzentrationen auftreten.

Im Falle geringer Überlagerungshöhen kann die Setzungsdifferenz zwischen Firste und Oberfläche als Indikator für die Ausbildung eines natürlichen Gewölbes herangezogen werden. Zwar sind größere Oberflächen- als Firstsetzungen nicht ungewöhnlich, plötzliche Zunahmen in der Differenz lassen allerdings auf starken Materialverlust oder aber auf einen Grundbruch der Kalottensohle schließen.

b) Verschiebungsverhältnisse

Es können Verhältnisse einzelner absoluter Verschiebungskomponenten zwischen zwei Messpunkten (z.B. das Setzungsverhältnis zwischen First- und Ulmpunkt eines Messquerschnitts) oder aber auch die Verhältnisse unterschiedlicher Komponenten eines Messpunktes gebildet werden (z.B. Längsverschiebung zu Setzung, Längsverschiebung zu Querverschiebung). Wiederum zweckmäßig ist die Darstellung dieser Verhältnisse als Zeit-Verschiebungskurven oder als Einfluss- und Trendlinien.

Aussagekraft:

Im Unterschied zu den Differenzen sind Verhältnisse von der Gebirgssteifigkeit nicht wesentlich abhängig. Bei gleichbleibender Gebirgsstruktur wird sich demnach ein annähernd konstantes Verhältnis z.B. der Setzungen zwischen Firste und Ulme einstellen. Bei Annäherung des Vortriebs an Störungszonen verändert sich dieses Verhältnis signifikant, wodurch eine zuverlässige Früherkennung derartiger Zonen möglich ist.

2.3.4 Grenzen der Interpretation

Geodätische Verschiebungsmessungen werden im untertägigen Hohlraumbau nach der NÖT nunmehr bereits seit vielen Jahren ausgeführt. Es liegen die Erfahrungen aus zahlreichen Tunnelprojekten vor. Dennoch gibt es bislang keine allgemeinen Regeln, wonach aus bestimmten Messergebnissen bestimmte Schlüsse zu ziehen sind. Darüber hinaus lassen sich aus den geodätischen Messungen allein auch noch keine Rückschlüsse auf Ursachen eines spezifischen Verformungsverhaltens ziehen. Dies kann erst durch die Einbeziehung weiterer Daten und Informationsquellen (Geologie, Beobachtungen vorort, Messergebnisse anderer geotechnischer Messeinrichtungen, Stützmitteleinsatz, etc.) in die Interpretation erreicht werden. Eine Grundvoraussetzung für eine sinnvolle Überwachung ist ein ausreichend dichtes Raster von Messpunkten und Messquerschnitten. Mit den heute üblichen Abständen ist durchaus ein dichtes Raster gegeben, dennoch sind Aussagen über dazwischen oder außerhalb liegende Bereiche spekulativ. Desweiteren können sinnvolle Aussagen erst einige Meter hinter der Ortsbrust getroffen werden, nachdem zumindest zwei Messepochen vorliegen.

Zu den zeitlichen Grenzen der Interpretation zählt der Umstand, dass nach wie vor Messungen meist nicht öfter als einmal täglich durchgeführt werden und zwischen Messung, Auswertung und Interpretation nochmals einige Stunden vergehen. Dieser Umstand hat schon öfters dazu geführt, dass rasch ablaufende kritische Entwicklungen entweder gar nicht erfasst oder zwar erfasst, jedoch erst zu spät interpretiert wurden. Eine Steigerung der Messhäufigkeit wird unter Verwendung automatischer Messsysteme möglich, ein Schritthalten der Interpretation stößt dann allerdings auf organisatorische Grenzen. Auch muss anerkannt werden, dass sich manche Phänomene wie z.B. der Bergsturz überhaupt nicht ankündigen und sich jeglicher Beobachtbarkeit im vorhinein entziehen.

Wesentliche Informationen zur Thematik der Erfassung, Auswertung und Interpretation von Verschiebungsmessdaten wurden [7, 8, 9, 18 - 22, 27 - 31] entnommen.

2.4 Zusammenfassung

Aus den angeführten Grundsätzen der Neuen Österreichischen Tunnelbauweise ist erkennbar, dass das Zusammenwirken von Gebirge und Ausbau zu einem Tragsystem eine eingehende messtechnische Überwachung erfordert. Ein Gleichgewichtszustand zwischen Gebirge und Bauwerk und damit die Sicherheit für den Hohlraum ist erreicht, wenn die zu beobachtenden Verformungen abgeklungen sind und ein „zulässiges“ Maß nicht überschritten haben. Die messtechnische Erfassung dieser Verformungen ist Teilaufgabe der Vermessung und bildet die Basis für weitreichende Entscheidungen auf der Baustelle. Diese sind Ergebnis einer laufenden (täglichen), kompetenten, geotechnischen Interpretation problemorientiert aufbereiteter Daten. Für diese Tätigkeit sind explizit die Erfahrung und das Fachwissen geotechnischer Experten notwendig. Einen wichtigen Teilaspekt dieser Interpretationsarbeit bildet das Erkennen „auffälliger“, das heißt, vom angenommenen Normalverhalten abweichender Verformungsentwicklungen. Das mit der vorliegenden Arbeit angestrebte Ziel, diese Aufgabenstellung speziell bei Verwendung automatischer Messsysteme auch weitgehend automatisch zu lösen, erfordert ein System, welches das zugrunde liegende Wissen verwalten und nutzen kann. Diese Möglichkeiten bieten *Wissensbasierte Systeme*. Die für das Verständnis der Arbeit wesentlichen Grundlagen derartiger Systeme sollen im nachfolgenden Kapitel beschrieben werden.

3. Wissensbasierte Systeme

3.1 Begriffsbestimmung, Charakterisierung

Eine allgemein anerkannte Definition, was ein wissensbasiertes System ist und wodurch es sich von anderen Systemen unterscheidet, ist schwer zu formulieren. Definitionsversuche sind insbesondere auch deshalb problematisch, weil der Begriff Wissen seinerseits nicht leicht zu definieren ist. Folgendes Zitat (Feigenbaum, McCorduck, Nii, 1988) kann als Ausgangspunkt für eine Begriffsklärung herangezogen werden:

“AI programs that achieve expert level competence in solving problems by bringing to bear a body of knowledge are called knowledge-based systems. Often, the term expert system is reserved for programs whose knowledge base contains the knowledge used by human experts in contrast to knowledge gathered from textbooks or non-experts. More often than not, the two terms expert systems and knowledge-based systems are used synonymously.”

Aus diesem Zitat geht zunächst nur hervor, dass es sich bei wissensbasierten Systemen um Computerprogramme handelt, die zur Lösung von Problemen in irgendeiner Weise Wissen anwenden. Eine Verwandtschaft mit den vom Begriff her eher geläufigen Expertensystemen wird angeführt, welche quasi als wissensbasierte Systeme betrachtet werden, die speziell die Kenntnisse und das Problemlösungsverhalten menschlicher Experten modellieren. Für das Verständnis zweckmäßiger ist die Angabe der charakteristischen Merkmale wissensbasierter Systeme [50]:

- *Lösung von Problemen, die einen gewissen Anspruch haben*
Ein System, welches nur triviale Probleme löst, wird eher nicht als wissensbasiertes System gelten.
- *Trennung von Problemwissen und Verarbeitung*
Dieses wohl wichtigste Merkmal sagt aus, dass das Problemwissen als eigenständiger Baustein (Wissensbasis) im System vorhanden ist. Die Verarbeitung dieses Wissens steuert eine davon getrennte Komponente.
- *Speicherung und Organisation von Wissen*
Das der Problemlösung zugrundeliegende Wissen ist in geeigneter Form gespeichert (repräsentiert) und im System lokalisierbar.
- *Verständliche Wissensanzeige*
Das Wissen wird in einer für den Benutzer verständlichen Form angezeigt. Es liegt „offen“.
- *Transparenz der Lösungsfindung*
Es ist für den Benutzer nachvollziehbar, wie das System zur Problemlösung kommt.
- *Erweiterbarkeit und Änderbarkeit des Wissens*
Die Wissensbasis ist nicht statisch, Änderungen können vorgenommen werden.

3.2 Anwendungsgebiete, Nutzen

Der praktische Nutzen derartiger Systeme besteht in der Möglichkeit, Experten bei Routinetätigkeiten zu entlasten bzw. einfache Probleme auch ohne Experten zu lösen. Allerdings muss trotz jahrelanger intensiver Forschung auf dem Gebiet der Künstlichen Intelligenz anerkannt werden, dass die hohen Erwartungen von in der Praxis im Einsatz befindlichen Systemen nur eingeschränkt erfüllt werden konnten. So können diese derzeit lediglich in sehr begrenztem Umfang Probleme lösen und Lösungen erklären. In der KI-Forschung folgte einer Zeit verfrühtem Enthusiasmus daraufhin eine Phase realistischer Einschätzung. Große Schwierigkeiten bereitet beispielsweise nach wie vor die Repräsentation von Allgemein- oder Hintergrundwissen, welches die Qualität der Problemlösung entscheidend mitbestimmt. Während menschliche Experten im Falle fehlenden Spezialwissens auf viele Schichten zunehmend allgemeineren Wissens und Erfahrungen zurückgreifen können, sind wissensbasierte Systeme dazu nicht in der Lage. Darüber hinaus wurden die umfassenden sensorischen, kognitiven und verbalen Fähigkeiten menschlicher Experten zu Beginn der Entwicklung expertenähnlicher Systeme grob unterschätzt. Erfolgreich sind derartige Systeme deshalb heute vor allem in solchen Gebieten, in denen:

- ein klar begrenztes Aufgabengebiet vorliegt,
- entsprechendes Expertenwissen vorhanden ist,
- die Datenerfassung wenig fehleranfällig ist,
- keine endgültigen Entscheidungen getroffen werden, sondern ein System in einen redundanten Entscheidungsprozess eingebettet ist,
- die zu lösenden Probleme nicht zu leicht, aber auch nicht zu schwierig sind und
- strukturierbare Probleme vorliegen, für deren Lösung menschliche Experten benötigt werden und die klassischen algorithmischen Lösungsverfahren schwer zugänglich sind.

Versteht man wissensbasierte Systeme als allgemeine Hilfsmittel zur Wissensverarbeitung, wird ein weiterer Nutzeffekt, der auch das große Interesse der Wirtschaft erklärt, verständlich. Gelingt es, Expertenwissen zu sammeln, zu speichern und nutzbar zu machen, so kann ein Unternehmen das private, durch u.U. langjährige Erfahrungen in der Praxis erworbene Wissen seiner Mitarbeiter trotz Ausscheidens aus dem Unternehmen dauerhaft und ökonomisch verfügbar halten und an neue Mitarbeiter weitergeben. Wissensrevolution stellt somit allgemein einen hohen wirtschaftlichen Wert dar; der Bedarf nach Werkzeugen zum Umgang mit Wissen (*Knowledge Management*) steigt laufend. Eigene Wissensingenieure befassen sich heute mit Fragen der Wissensakquisition, worunter allgemein die Erhebung und Übertragung menschlicher Expertisen in eine formale Notation verstanden wird [61].

Schätzungen gehen davon aus, dass weltweit bis zu 5000 solcher Systeme in praktischem Einsatz sind und zum Teil erhebliche Gewinne einbringen [42]. In Geodäsie und Geotechnik finden sich nach wie vor kaum tatsächlich kommerziell genutzte Systeme. Entwicklungen wurden mit mehr oder weniger zufriedenstellenden Ergebnissen beispielsweise in folgenden Bereichen angestrengt:

in der Geodäsie und Messtechnik

- Bewertung von Grundstücken [39],
- Deformationsanalyse [39,40,57],
- Auswertung von VLBI-Daten [Dissertation in Bearbeitung],
- Unterstützung photogrammetrischer Bauaufnahmen [39],
- Kartographische Mustererkennung, wissensbasierte Bildinterpretation [39],
- Aufbau intelligenter 'Mobile Mapping Systems' [10],
- Messdatenerfassung und -analyse in der Bauwerksüberwachung [49],
- Aufbau wissensbasierter Geoinformationssysteme [68].

in der Geotechnik

- Risikobewertung von Hanggleitungen, Hangstabilitätsprognosen [41,51,84],
- Design des Stützmitteleinsatzes bei Tunnelbauten [43],
- Simulation geotechnischer Laborversuche [48],
- Schätzung von Gesteinsparametern [79, 80, 81],
- Katastrophenvorhersage bei Tunnelvortrieben [87].

3.3 Architektur eines Wissensbasierten Systems

Das grundlegende Organisationsprinzip wissensbasierter Systeme bildet im Gegensatz zu konventioneller Software die Trennung von Wissen, Problemlösungsstrategie und Daten (Abb. 12). Es wird davon ausgegangen, dass die Unterschiede in den einzelnen Anwendungsbereichen hauptsächlich in den Wissensinhalten liegen, während die Problemlösungsstrategien einander jeweils ähnlich sind. Bei der konventionellen Datenverarbeitung steht die Reihenfolge der Verarbeitungsschritte für jede Eingabekonstellation vorab über den Programmcode fest. Daraus folgt, dass Daten und Wissen über die Problemlösung im Algorithmus miteinander vermischt werden. Bei wissensbasierten Systemen wird dies vermieden, indem die einzelnen Wissenselemente getrennt von den Daten in bausteinhafter Form (z.B. als Regeln) abgelegt werden. Die Abarbeitung der Wissensbausteine führt ein unabhängig vom Wissen entwickelter Schlussfolgerungsprozess (Inferenzprozess) aus, welcher zumeist konventionell programmiert wird.

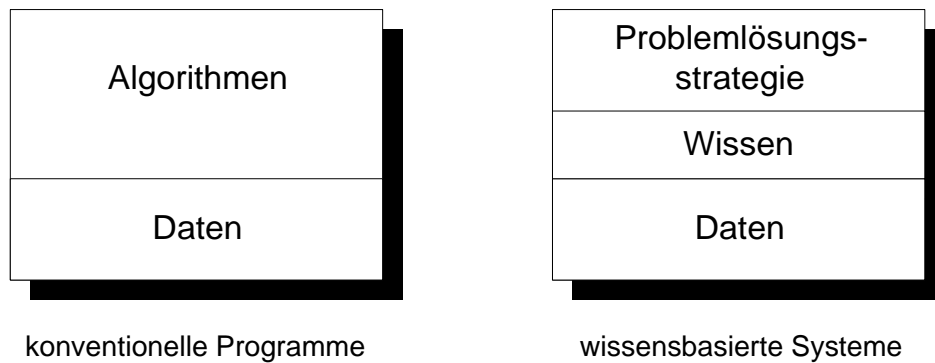


Abb. 12: Aufbau von konventionellen Programmen und wissensbasierten Systemen [74]

In Schlagworten:

“Es muss nicht programmiert werden, wie ein Problem gelöst werden soll, sondern es muss dem System mitgeteilt werden, was es zur Problemlösung wissen muss.” [46]

Die wichtigsten Elemente eines wissensbasierten Systems sind die Wissensbasis, die Problemlösungs-, die Erklärungs-, die Wissenserwerbs und die Dialog- bzw. Kommunikationskomponente (Abb. 13).

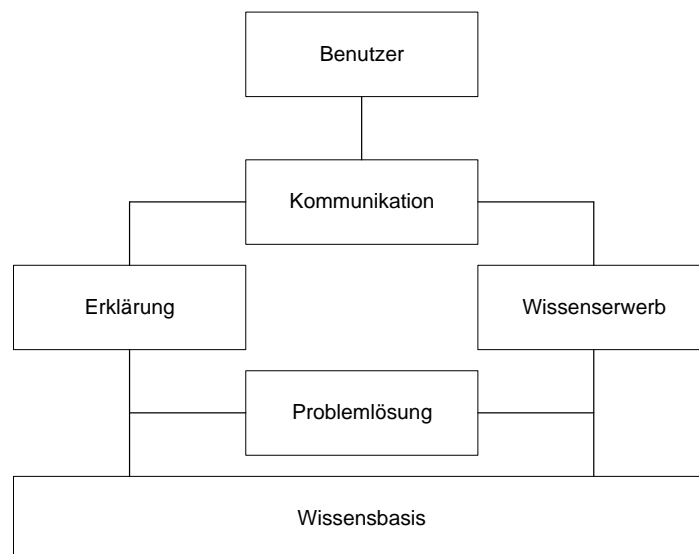


Abb. 13: Architektur eines wissensbasierten Systems [67]

Die Wissensbasis enthält in strukturierter und codierter Form das gesamte Wissen des Systems. Die Problemlösungskomponente löst die gestellten Aufgaben durch Ausführung von Inferenzen auf der Wissensbasis, die Wissenserwerbskomponente ermöglicht dem Benutzer, Expertenwissen in die Wissensbasis zu integrieren, zu ändern bzw. zu erweitern, die Erklärungskomponente begründet die erarbeiteten Lösungen und die Dialogkomponente steuert die Kommunikation mit dem menschlichen Benutzer.

Hinsichtlich der Art der zu lösenden, konkreten Probleme können drei wesentliche Problemlösungstypen unterschieden werden [74]:

- **Diagnostik** Lösung eines Problems durch Auswahl aus einer Menge vorgegebener, alternativer Lösungen,
- **Konstruktion** Zusammensetzung einer Lösung aus kleinen Bausteinen,
- **Simulation** Herleitung von Folgezuständen aus einem Ausgangszustand.

Differenziertere Einteilungen führen noch weitere Problemlösungskategorien wie Interpretation, Planung, Design, Konfiguration, Klassifikation, Optimierung, Reparatur, Überwachung, Kontrolle, Steuerung, Vorhersage, Suche, Auskunft, u.s.w. an. Entscheidend ist, dass in Abhängigkeit von der Art des vorliegenden Problems bestimmte Wissensrepräsentationstechniken besser oder weniger gut geeignet sind. Für diagnostische Probleme zeigt sich, dass insbesondere der regelbasierte Ansatz weit verbreitet ist.

3.4 Wissensarten

Wissen bildet als notwendiges Attribut eines intelligenten Systems die Voraussetzung für dessen mehr oder weniger rekonstruierbares bzw. vorhersehbares Verhalten. Wissen ist mehr als nur Information, es umfasst darüber hinaus die Beschreibung, wie Informationen zueinander in Beziehung stehen oder zu stellen sind. Ein Definitionsversuch lautet:

“Wissen ist interpretierte Information.” [39]

An anderer Stelle beschreibt man Wissen allgemein als:

“... Inbegriff von Kenntnissen möglichst objektiven, aber auch subjektiven Charakters” [46]

Eine eher metaphorische Erklärung lautet:

“A book is a source of knowledge, but without the reader, the book is just ink on paper.”[82]

Soziologisch lassen sich zwei Wissensarten unterscheiden [46]:

- **öffentliches Wissen** kann in Büchern oder Richtlinien nachgelesen werden,
- **persönliches Wissen** umfasst Erfahrungen, Heuristiken, Daumenregeln und viel vages und unsicheres Wissen.

Mit Bezug auf den Prozess der Wissensverarbeitung können zwei Wissensklassen differenziert werden [46]:

- **Sachwissen** beinhaltet, was die Lösung eines Problems ist,
- **Kontrollwissen** beinhaltet, wie die Lösung gefunden wird.

Eine weitere, mehr objektorientierte Klassifikation [39] definiert:

- **Fakten-Wissen** beinhaltet Aussagen über Ausprägung bzw. Relation bestimmter Attribute von Objekten,
- **Regel-Wissen** beinhaltet Aussagen über Prozeduren (Regeln), mit welchen aus bekannten Fakten neue Fakten abgeleitet werden können,
- **Objekt-Wissen** beinhaltet das auf ein spezielles Objekt bezogene Gesamtwissen und umfasst Fakten und Regeln.

Unter dem Aspekt der Bedeutung von Wissen in Entscheidungsprozessen läßt sich noch unterscheiden [39]:

- **System-Wissen**
Wissen über Struktur und Eigenschaften einer Ausgangssituation sowie die Kenntnis, welche Informationen für eine gegebene Entscheidungsproblematik erforderlich sind,
- **Prozedurales Wissen**
Kenntnis über Handlungsalternativen, Vorgehensweisen, Verfahren, Methoden und Modelle (spezialisiertes Regel-Wissen),
- **Wertungs- und Entscheidungswissen**
Kenntnis, welche Aktion hinsichtlich welcher Ziele und Restriktionen vorzuziehen ist und wie die prognostizierten Entscheidungsauswirkungen bzgl. der verfolgten Zielsetzungen zu bewerten sind.

Mit Bezug zum vorliegenden Anwendungsgebiet (*Kapitel 2*) ist vor allem wichtig, dass Wissen sowie daraus abgeleitete Folgerungen aus verschiedenen Gründen *unsicher* sein können. Quellen der Unsicherheit im Bereich des Fakten-Wissens resultieren beispielsweise aus:

- **fehlenden Daten**
z.B. falls Messpunkte nicht ausreichend oft (dicht) beobachtet wurden, um Aussagen über deren Verschiebungsverhalten treffen zu können.
- **unvollständigen Daten**
z.B. falls einzelne Messpunkte nur der Höhe nach, aufgrund eines Orientierungsfehlers jedoch nicht der Lage nach ausgewertet werden können.
- **ungenauen, unscharfen Daten**
Geodätische Messungen sind zumindest mit zufälligen Fehlern behaftet, Eine *Messunschärfe* ist zu berücksichtigen. Die erzielten Genauigkeiten reichen mitunter für bestimmte Interpretationen nicht aus.
- **unzuverlässigen Daten**
Geodätische Messungen können grob fehlerhaft, systematisch verfälscht oder gar wissentlich manipuliert sein. Eine gewisse Rolle spielen hier auch Redundanz und Kontrolle der Daten.

3.5 Wissensrepräsentation

Grundlegende Voraussetzung für den Bau eines wissensbasierten Systems ist die Möglichkeit, Wissen in einer verständlichen Form zu repräsentieren. Wissensrepräsentation kann als eine Art formale Sprache angesehen werden, in der Expertenwissen ausgedrückt werden muss. Hierfür existieren im Wesentlichen

- **prozedurale,**
- **logikbasierte,**
- **objekt-orientierte und**
- **hybride (z.B. regelbasierte) Formalismen.**

Diese Unterteilung bedeutet keine strenge Trennung, da sich bestimmte nicht logikbasierte Formalismen (z.B. gewisse Frames, Prozeduren) auch in eine logikbasierte Darstellungsform transformieren lassen. Mitunter kann ein bestimmter Formalismus auch nicht exakt in eine der angegebenen Gruppen eingeordnet werden. Anhand einfacher, frei konstruierter und dem vorliegenden Anwendungsgebiet angepasster Beispiele sollen einige Repräsentationsformalisten erläutert und deren Vor- und Nachteile sowie Unterschiede verdeutlicht werden. Mit der folgenden Zusammenstellung soll ein eher allgemeiner Überblick gewährt werden, die Wahl des in der vorliegenden Arbeit verwendeten regelbasierten Ansatzes wird erst in den weiteren Kapiteln 4 und 5 konkreter begründet.

- **Prozedurale Methoden [50]**

Wissen wird in Form einzelner Prozeduren dargestellt. So könnte z.B. das Wissen darüber, ob ein Deformationspunkt x mit der Stationierung S innerhalb des Gebirgstyps A1 (standfestes Gebirge) liegt, wie folgt dargestellt werden (Abb.14, in Pseudocode formuliert):

```
function gebirgstyp_A1 (x) : boolean
  if ((x.S > 250) and (x.S < 325)) then return true
  else if ((x.S > 480) and (x.S < 490)) then return true
  else return false
```

Abb. 14: Beispiel prozeduraler Wissensrepräsentation

Folgende positiven und negativen Eigenschaften können festgestellt werden:

- + Die Darstellung ist leicht verständlich. Anhand der Reihenfolge der if - statements kann implizit Wissen über die Häufigkeit des Prozedurergebnisses genutzt werden, wodurch sich die Antwortzeit verkürzt. So ist z.B. in der gegebenen Prozedur die Reihung des Stationierungsbereiches zwischen 480 und 490 nach dem Bereich zwischen 250 und 325 sinnvoll, da in diesem vergleichsweise weniger Deformationspunkte liegen werden.
- Bei der Erweiterung des Wissens, etwa um den Sachverhalt, dass weitere Stationierungsbereiche und alle darin befindlichen Messpunkte dem Gebirgstyps A1 zuzuordnen sind, muss explizit die bestehende Repräsentation verändert werden. Es ist nicht möglich, dieses neue Wissen einfach in der Wissensbasis abzulegen. Darüber hinaus sind Prozeduren nur zur Beantwortung spezifischer Fragestellungen imstande. Wenn auch das Wissen in der vor-

liegenden Prozedur eigentlich vorhanden ist, so kann diese dennoch nicht die Frage: „In welchen Stationierungsbereichen liegt der Gebirgstyp A1?“ beantworten. Dazu müßte eine andere, neue Prozedur formuliert werden.

- **Logikbasierte Methoden [50,67,74]**

Wissensrepräsentation kann auch auf Grundlage mathematischer, formaler Logiken erfolgen. Weit verbreitet und theoretisch am besten untersucht ist die Prädikatenlogik 1. Stufe, die eine Erweiterung der klassischen Aussagenlogik darstellt. Sie ist gekennzeichnet durch eine allgemeine und klar definierte Syntax, aufgebaut aus sogenannten Konstanten-, Variablen-, Funktionen- und Prädikatensymbolen, die sich mit Konnektionssymbolen („und“, „oder“, „nicht“, „impliziert“) und Quantorensymbolen („für alle“, „es existiert“) zu Formeln verbinden lassen. Repräsentationsformalismus und Ableitungsstrategie gemeinsam bilden ein Kalkül (bekannteste Vertreter: Resolutionskalkül, Hornklauselkalkül). Die Nützlichkeit eines Kalküls ergibt sich aus seinen inneren Eigenschaften wie Korrektheit, Mächtigkeit, Vollständigkeit, Entscheidbarkeit, etc. und letztlich daraus, wie gut ein Problembereich in dem Kalkül beschrieben werden kann. Als Konzept zur Wissensrepräsentation und –herleitung wird diese Technik beispielsweise in der bekannten Programmiersprache PROLOG verwendet.

Das Wissen aus dem vorigen Beispiel lässt sich prädikatenlogisch durch folgende Sätze darstellen:

$$\begin{array}{l} \forall^1 x [(stationierung(x) > 250 \wedge^2 stationierung(x) < 325) \rightarrow^3 in_gebirgstypA1(x)] \\ \forall x [(stationierung(x) > 480 \wedge stationierung(x) < 490) \rightarrow in_gebirgstypA1(x)] \end{array}$$

Abb. 15: Beispiel logikbasierter Wissensrepräsentation

Zum Unterschied zur prozeduralen Darstellung ließe sich jetzt auch ein weiterer Stationierungsbereich (genauer: alle Messpunkte dieses Bereichs) dem Gebirgstyp A1 durch einen ähnlichen weiteren Satz zuordnen und in die Wissensbasis aufnehmen. Nicht bekannt ist allerdings, was über Messpunkte außerhalb der angegebenen Stationierungsbereiche ausgesagt werden kann, da dies hier nicht explizit formuliert ist. Im Bereich der nichtmonotonen Logiken existieren hierfür Möglichkeiten (z.B. Closed World Assumption), auch negative Fakten („alles, was nicht wahr ist, ist falsch“) effizient zu repräsentieren.

Für den Bau wissensbasierter Systeme ist die praktische Bedeutung klassischer Logiken relativ gering. Für viele Anwendungsbereiche machen sich psychologische Schwierigkeiten, mangelnde Mächtigkeit und Adäquatheit sowie Effizienzprobleme nachteilig bemerkbar, insbesondere dann, wenn viel unsicheres, unvollständiges oder zeitabhängiges Wissen vorliegt und Schlüsse nicht unbedingt formallogisch gezogen werden. Diese Schwächen können mit Hilfe nichtklassischer Logiken (nichtmonotone Logiken, modale Logiken) teilweise behoben werden. Die Berücksichtigung von Unsicherheiten in den Schlussfolgerungen kann beispielsweise mit numerischen, wahrscheinlichkeitstheoretischen Ansätzen (Bayes'sches Theorem) oder mit Verfahren wie die Fuzzy Logik oder die Theorie der Belieffunktionen modelliert werden. Unvollständiges Wissen läßt sich beispielsweise mit Methoden der Defaultlogik behandeln.

¹ \forall : Quantorensymbol, zu lesen als: „ für alle“

² \wedge : Konnektionssymbol, zu lesen als „ und“

³ \rightarrow : Konnektionssymbol, zu lesen als „ impliziert“

- **Wissensrepräsentation in Form von Fakten und Regeln [46,50]**

Fakten und Regeln (auch: Produktionen) sind die von den meisten wissensbasierten Systemen verwendete Form der Wissensrepräsentation. Als für die Praxis vorteilhaft erweist sich, dass Experten ihr Wissen häufig in Form von Regeln zum Ausdruck bringen können, diese daher als eine natürliche Repräsentationsform empfunden werden. Sie sind deshalb sehr gut geeignet, Entscheidungswissen und Heuristiken auszudrücken. Regeln bestehen im Wesentlichen aus einem Bedingungsteil (Faktenmuster) und einem Aktionsteil, wobei implizit davon ausgegangen wird, dass bei Auftreten mehrerer Bedingungen diese konjunktiv verknüpft sind. Der Bedingungsteil wird oft als *left hand side* (LHS), der Aktionsteil als *right hand side* (RHS) bezeichnet. Ein Regel- oder Produktionensystem besteht aus dem Arbeitsspeicher (*working memory*), in welchem die Fakten gespeichert sind und dem Regelspeicher (*rule memory*). Fakten werden zumeist in Form einzelner Instanzen der in prozeduralen Sprachen bekannten Datentypen (record, structure) dargestellt.

Als Fakten und Regel ließe sich das Wissen aus vorigem Beispiel folgendermaßen darstellen (in modifizierter Syntax einer regelbasierten Sprache formuliert):

<u>Fakten des working memorys:</u>	[gebirgstyp_A1 (s1 250) (s2 325)]	
	[gebirgstyp_A1(s1 480) (s2 490)]	
<u>Regel:</u>		
Regelname: ordne_zu_gebirgstypA1		
?faktadresse <- [messpunkt (s ?s) (gebirgstyp unbekannt)] ⁴	} Bedingungs- teil	
[gebirgstyp_A1 (s1 ?s1 &: (?s > ?s1)) (s2 ?s2 &: (?s < ?s2))] ⁵		
->		
modify ?faktadresse [(gebirgstyp A1)] ⁶		—————> Aktionsteil

Abb. 16: Beispiel einer Regel und Fakten

Würde dem working memory ein neuer Fakt messpunkt mit zunächst noch unbekanntem Gebirgstyp hinzugefügt werden und die Regel geladen sein, so würde sie abhängig von seiner Stationierung s sein Attribut gebirgstyp von unbekannt auf A1 verändern (oder auch nicht).

Im Zuge des Designs eines Produktionensystems ist zu entscheiden, welches Wissen besser als Fakten und welches geeigneter als Regeln repräsentiert werden kann. Zur Darstellung von Unsicherheit gibt es ebenfalls Möglichkeiten, so z.B. durch eine Zuordnung von Sicherheitsfaktoren (Certainty Factors) zu Fakten und Regeln.

- **Objekt-orientierte Methoden, Semantische Netze [46]**

In einem semantischen Netz wird Wissen in Form eines gerichteten Graphen, bestehend aus Knoten, die durch benannte Kanten miteinander verbunden sind, dargestellt (Abb. 17). Die Knoten repräsentieren darin Konzepte wie Objekte, Klassen, Ereignisse, etc. während die Kanten beliebige binäre Relationen („hat“, „Element_von“, „liegt_in“) zwischen zwei Knoten

⁴ 1. Bedingung: prüft auf die Existenz eines Fakts messpunkt mit unbekanntem Gebirgstyp und übergibt seine Stationierung s der Variablen ?s, die interne Adresse des Fakts wird auf die Variable ?faktadresse übergeben.

⁵ 2. Bedingung: prüft auf die Existenz eines Fakts gebirgstyp_A1 und gleichzeitig, ob die Stationierung ?s des Fakts messpunkt im Intervall zwischen ?s1 und ?s2 liegt.

⁶ Aktion: es wird das Attribut gebirgstyp des Fakts messpunkt von unbekannt auf A1 verändert.

beschreiben. Mit Hilfe hierarchischer Relationen („ist ein“) lassen sich speziell Vererbungs-konzepte anschaulich darstellen. Es existieren verschiedene Systeme, die sich im Wesentlichen durch ihre Notation, den Kantentyp und die Vererbungsstrategie unterscheiden. Da sich das vorige Beispiel schlecht für die Darstellung als Semantisches Netz eignet, soll ein anderes konstruiert werden:

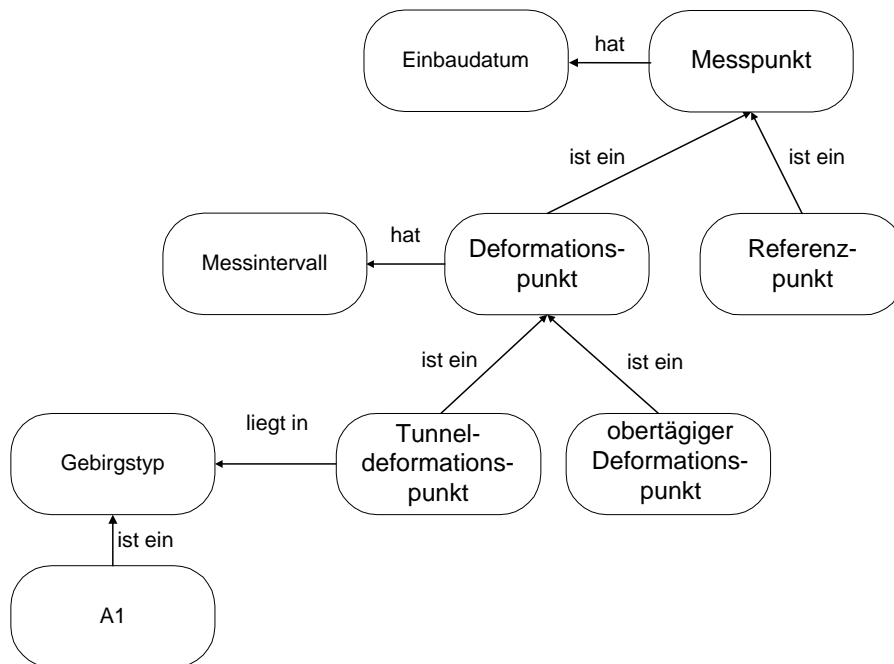


Abb. 17: Beispiel eines Semantischen Netzes mit Vererbung

Für den Benutzer sind bei dieser Methode die Wissensinhalte besser überschaubar als bei den bisher beschriebenen String-orientierten Darstellungen. Ein Grund hierfür ist auch, dass inhaltlich zusammengehöriges Wissen nahe zueinander repräsentiert wird. Als Organisationsprinzip einer Wissensbasis ermöglicht dies eine gezielte Suche und ein rasches Auffinden von Wissensinhalten. Die Kanten dienen dabei als Zugriffspfade.

Problematisch für semantische Netzformalismen ist allerdings die Darstellung von Negationen, Disjunktionen, Überdeckungen und Mehrfachvererbungen. Für eine konkretes Wissensgebiet ist zudem das mitunter nicht triviale Problem zu lösen, welche Kanten- und Knotentypen zur Repräsentation wessen eingesetzt werden sollen. Auch existieren für die Semantik derartiger Netze keine festen Standards und sie enthalten keine Informationen, wie bestimmtes Wissen für einen speziellen Zweck angewendet werden soll.

- **Objekt-orientierte Methoden, Frames [46]**

Ein Frame ist eine komplexe Datenstruktur zur Repräsentation von Objekten oder stereotypen Situationen, also von irgendwelchen abstrakten oder real existierenden Dingen. Ein Frame kann auch als ein Knoten innerhalb eines Semantischen Netzes verstanden werden. Frames können in hierarchischer Beziehung zueinander stehen, d.h. Hierarchien aus Objektinstanzen und übergeordneten Objekttypen bilden. Syntaktisch sind Frames durch Deklaration von Framename, Ober- und Unterkonzepten, Slotnamen mit Slotwerten und Aspektnamen mit Aspektwerten festzulegen. Komplexere Framesysteme erlauben Prozeduren (*procedural attachments*) als Slotwerte bzw. dass Slotwerte ihrerseits wieder ganze Frames sein können.

<i>Frame</i> name: Tunneldeformationspunkt	
<i>Oberkonzepte</i>	Deformationspunkt, Messpunkt
<i>Unterkonzepte</i>	
<i>Slotname</i>	<i>Slotwert</i>
Gebirgstyp	Prozedur <i>berechne_gebirgstyp</i>
Position	Stationierung <i>Aspektname</i> <i>Aspektwert</i> Restriktion > 0
...	...

Abb. 18: Beispiel eines Frames

Ähnlich wie semantische Netze realisieren Frames eine dem Menschen sehr entgegenkommende Wissensrepräsentation. Sie geben quasi den Vorstellungen, die man a priori von bestimmten Objekten hat, einen Rahmen, woher sich die Bezeichnung auch ableitet. In diesen Rahmen werden die Eigenschaften eines Objekts, seine Teile, Relationen zu anderen Objekten, etc. „hineingegeben“. Von der Idee her sind sie so allgemein, dass kaum Nachteile angeführt werden können. Sie erben im Prinzip nur die Nachteile der Mittel, mit denen sie implementiert werden, wofür häufig LISP-basierte Sprachen verwendet werden. Frame-systeme können aber auch als Semantische Netze oder mittels mehrsortiger Prädikatenlogik implementiert werden.

• Hybride Systeme

Die beschriebenen Basiskonzepte schließen einander nicht aus, sondern können sich für eine Anwendung zur Verbesserung der Natürlichkeit, der Änderungsfreundlichkeit und der Modularität der Wissensrepräsentation auch ergänzen. Der zu wählende Repräsentationsformalismus soll weitgehend dem vorliegenden Problem angepasst sein. Zur Prüfung dieser Forderung sind eine Reihe von Adäquatheitskriterien zu beachten:

- **Expressivität** Der Formalismus soll gewährleisten, dass alle benötigten Fakten adäquat dargestellt werden können.
- **Dichte der Darstellung** Das Wissen soll möglichst redundanzfrei und kompakt repräsentiert sein.
- **Ergonomische Aspekte** Die Wissensbasis soll einfach erweitert und abgeändert werden können.
- **Überprüfbarkeit** Der Formalismus soll eine Kontrolle der Korrektheit und Vollständigkeit des Wissens zulassen.

3.6 Methoden der Wissensherleitung, Inferenzmethoden

Die Problemlösungskomponente aus Abb. 13 verkörpert die Schlussfolgerungskomponente (Inferenzkomponente) eines wissensbasierten Systems. Sie wendet das repräsentierte Expertenwissen auf die vorhandenen Daten (Faktenwissen) an, um eine Lösung für ein konkretes Problem zu finden. Dabei kommen verschiedene Kontroll- bzw. Abarbeitungsstrategien (Metawissen) zum Einsatz, um die Effizienz der Problemlösung zu beeinflussen. Inferenz stellt sich in Abhängigkeit vom Repräsentationsformalismus unterschiedlich dar [82]:

- **Inferenz bei prozeduraler Wissensrepräsentation**

Prozedural dargestelltes Wissen verknüpft die Spezifikation eines Problems eng mit dessen Lösung. Wissen und Inferenzregeln werden gleichermaßen durch spezialisierte, zielorientierte Prozeduren repräsentiert, die in einer festgelegten Reihenfolge aufgerufen werden. Prozeduren aktivieren und unterbrechen andere oder reaktivieren unterbrochene Prozeduren und liefern gegebenenfalls dabei Zwischenergebnisse. Im Falle datengesteuerter Prozeduren (Dämonen) können sich diese auch, falls ein entsprechendes Aktivierungsmuster in der Datenbasis angetroffen wird, selbst aufrufen.

Von Vorteil ist, dass Prozeduren eine bestimmte Verarbeitungsrichtung, und zwar alle vorhergesehenen oder vorhersehbaren Inferenzen unterstützen. Suchprozesse werden damit eliminiert, eine hohe Effizienz für spezielle Zwecke erzielt. Nachteilig sind mangelnde Transparenz, Modularität und Flexibilität. Der Gewinn an Effizienz wird erkauft durch einen Verlust an Allgemeinheit.

- **Inferenz bei logikbasierter Wissensrepräsentation**

Neues Wissen wird aus der Wissensbasis durch syntaktische Umformungen, das heißt, durch die systematische Anwendung von Schlussregeln (Inferenzregeln) auf logische Formeln hergeleitet. Im Bereich der klassischen Logiken bilden der *modus ponens* (Abb. 19a) und der *modus tollens* (Abb. 19b) die wohl bekanntesten Vertreter:

modus ponens (Schluss aus Implikation \rightarrow und Fakt):

$$\forall x (\text{deformationspunkt}(x) \rightarrow \text{messpunkt}(x))$$

$$\text{deformationspunkt}(\text{pkt_27})$$

Schluss: $\text{messpunkt}(\text{pkt_27})$

Abb. 19a: Beispiel einer Inferenz nach dem *modus ponens*

modus tollens (Schluss aus Implikation und Negation \wedge):

$$\forall x (\text{deformationspunkt}(x) \rightarrow \text{messpunkt}(x))$$

$$\wedge \text{messpunkt}(\text{pkt_27})$$

Schluss: $\wedge \text{deformationspunkt}(\text{pkt_27})$

Abb. 19b: Beispiel einer Inferenz nach dem *modus tollens*

Im Bereich der nichtklassischen (nichtmonotonen) Logiken existieren erweiterte Modi von Inferenzen, sogenannte *Non-Standard-Inferenzen*, wie z.B. *Default Reasoning*, *Abduktives Schließen* oder *Probabilistisches Schließen*:

Abduktive Inferenz

Es soll eine möglichst plausible Erklärung für bestimmte Sachverhalte gefunden werden. In der Realität muss dieser Schluss jedoch nicht unbedingt richtig sein (Abb. 20a).

$$\begin{array}{l} \forall x (\text{in_gebirgstypA1}(x) \rightarrow \text{auffällig}(x)) \\ \text{auffällig}(\text{pkt_27}) \\ \hline \text{Schluss: in_gebirgstypA1}(\text{pkt_27}) \end{array}$$

Abb. 20a: Beispiel einer abduktiven Inferenz

Probabilistisches Schließen

Es werden Schlüsse aus unsicherem Wissen gezogen. Hierfür kommen wahrscheinlichkeitstheoretische Verfahren (z.B. Bayes'sches Theorem) oder auch einfachere Methoden (Konfidenz- oder Evidenzfaktoren) zur Anwendung.

Ein Beispiel nach dem Bayes'schen Theorem:

Annahme: Es gelten die folgenden Wahrscheinlichkeiten P :

A1: $P(\text{Ein Messpunkt ist beschädigt}) = 0.05$
 A2: $P(\text{Eine Einzelmessung ist geotechnisch auffällig}) = 0.2$
 A3: $P(A2/A1) = 0.9$

$P(A2/A1) = 0.9$ besagt, dass ein beschädigter Messpunkt zu 90% eine geotechnisch auffällige Messung zur Folge hat (bedingte Wahrscheinlichkeit).

Schluss (gem. Bayes): $P(A1/A2) = 0.05 \cdot \frac{0.9}{0.2} = 0.225$

Die Wahrscheinlichkeit, dass eine geotechnisch auffällige Einzelmessung einen beschädigten Messpunkt als Ursache hat, liegt bei 22.5 %.

Abb. 20b: Beispiel probabilistischen Schließens

Für begrenzte Anwendungsbereiche liefern nichtmonotone Schlussmethoden recht gute Resultate. Sie ermöglichen beispielsweise das Schließen auf Basis unvollständigen oder unsicheren Wissens, weisen aber das Problem einer allgemein höheren Berechnungskomplexität auf. Wünschenswerte Eigenschaften wie Vollständigkeit und Entscheidbarkeit können dadurch stark eingeschränkt werden bzw. verlorengehen.

- **Inferenz bei regelbasierter Wissensrepräsentation**

Werden Regeln zur Wissensrepräsentation verwendet, kann prinzipiell zwischen ziel- und datengetriebener Inferenz unterschieden werden:

Vorwärtsverkettung (forward-chaining)

Es wird datengetrieben vorgegangen. Alle Schlussfolgerungen, die aus der Datenbasis herleitbar sind, werden hergeleitet (alle Wirkungen aus den Ursachen, alle Ereignisse aus den Voraussetzungen,...). Der Inferenzprozess erfolgt in drei Phasen. In der ersten Phase (Musterung) werden die Bedingungen aller Regeln daraufhin untersucht, ob diese durch Elemente des working memorys (siehe S. 24) erfüllt werden. Die Regeln werden gegen das working memory „gematcht“. Ergebnis ist die Konfliktmenge, die die sogenannten Regelinstanzen enthält. Eine Regelinstanz ist eine Datenstruktur, die den Namen der Regel sowie alle Elemente des working memorys enthält, die die Bedingungen der Regel erfüllen. Im nächsten Schritt erfolgt die Regelauswahl. Diese kann durch entsprechende Auswahlstrategien (explizite Regelprioritäten, Regelbevorzugung aufgrund der Anzahl der Bedingungen, etc.) gesteuert werden. Zum Schluss wird die Aktion der ausgewählten Regel ausgeführt. Dies kann eine Änderung des working memorys zur Folge haben, der Zyklus beginnt von neuem.

<u>Fakten:</u>	<i>Das Messgerät ist defekt. Das Messgerät kann nicht selbst repariert werden. Es ist vorort kein Ersatzgerät vorhanden.</i>
<u>Regeln:</u>	<i>Wenn das Messgerät defekt ist und nicht selbst repariert werden kann und vorort kein Ersatzgerät vorhanden ist dann kann die Messung nicht ausgeführt werden. Wenn die Messung nicht ausgeführt werden kann dann wird die Messung nicht bezahlt werden. Wenn das Messgerät defekt ist und nicht selbst repariert werden kann dann ist die Versicherung zu informieren und das Messgerät muss im Werk repariert werden.</i>
<u>Schlüsse:</u>	<i>Die Messung kann nicht ausgeführt werden. Die Messung wird nicht bezahlt werden. Die Versicherung muss informiert werden. Das Messgerät muss im Werk repariert werden.</i>

Abb. 21: Beispiel einer Vorwärtsverkettung in regelbasierten Systemen

Diese Strategie ist sinnvoll, falls die Anzahl der Lösungsmöglichkeiten groß, das Ziel noch unbekannt ist und erst konstruiert werden soll. Nachteilig beim Vorwärts-Schließen wirkt, dass ohne zusätzliche Kontrollvorschriften (Abbruchkriterien, Regelhierarchien,...) die Inferenz in die Tiefe aber auch in die Breite desorientiert ablaufen kann.

Rückwärtsverkettung (backward-chaining)

Es wird zielgetrieben vorgegangen. Nur jene Regeln werden berücksichtigt, deren Aktionsteile ein vorgegebenes, behauptetes Ziel verifizieren. Das Regelsystem wird rückwärts durchsucht, bis die Behauptung bestätigt werden kann. Diese zur Vorwärtsverkettung alternative Abarbeitungsstrategie erfordert eine etwas andere Art der Musterung, und zwar ein zielorientiertes Auffinden der gerade anwendbaren, relevanten Regeln. Unter Verwendung des Resolutionskalküls kann dies mit Hilfe des Unifikationsprinzips gelöst werden. Notwendig ist dabei, dass das Ziel ebenso in geeigneter Form repräsentiert wird. PROLOG ist wohl der bekannteste Vertreter dieser Methode.

Diese Inferenzstrategie wird eingesetzt, wenn die möglichen Ergebnisse bekannt sind und in überschaubarer Anzahl vorliegen wie z.B. bei Diagnose- und Klassifikationsproblemen. In vielen Anwendungsbereichen erweist sich eine Kombination von Vorwärts- und Rückwärtsstrategie als zweckmäßig.

- **Inferenz bei Semantischen Netzen**

Die Verarbeitung semantischer Netze geschieht durch Operationen bzw. aktive Prozesse. Diese werden meist prozedural repräsentiert. Standardoperationen sind Such- oder Matchingprozesse, die feststellen, ob und wo im Netz spezielle Informationen repräsentiert sind. Die Algorithmen hierfür basieren auf der Propagierung von Werten bzw. Markierung von Knoten durch das Netz (*marker propagation*) sowie auf Mustervergleichen (*pattern matching*). Vererbung spielt bei der effizienten Gestaltung von Inferenz eine gewichtige Rolle. Im Prinzip können für Semantische Netze jedoch beliebige Inferenzmechanismen, so auch *Non-Standard-Inferences* installiert werden.

- **Inferenz bei framebasierter Wissensrepräsentation**

Bei framebasierter Wissensdarstellung besteht der Inferenzmechanismus darin, dass durch einen globalen Prozess bestimmte Frames ausgewählt, Instanzen bzw. individuelle Objekte erzeugt und deren Slots mit Werten gefüllt werden. Durch die Möglichkeit, den einzelnen Slots Prozeduren zuzuweisen und zu aktivieren, kann der Inferenzvorgang effizient unterstützt werden. Es können jedoch nur solche Inferenzen gezogen werden, für deren Resultat ein Slot in einem Frame existiert. „Verstehen“ einer Situation heißt für ein Framesystem, in seinem Bestand gespeicherter Frames nach jenen zu suchen, die anwendbar, d.h. geeignet scheinen, die vorliegende Situation (das vorliegende Objekt) als Spezialisierung eines existierenden, allgemeineren Frames zu betrachten. Derjenige Frame, der die Situation am besten widerspiegelt, wird sodann aktiviert, die variablen Teile des Frames werden an die Spezifika der aktuellen Situation angepasst (Instantiierung eines Frames). Grundoperationen in Framesystemen sind das Laden, Abfragen, Anfügen, Ändern, Löschen und Speichern einzelner Frames.

3.7 Methoden der Wissenserhebung

Aufgabe der Wissenserhebung ist es, die für die betrachtete Domäne relevanten Fakten und die besonderen Fähigkeiten der in der Domäne arbeitenden Experten ans Licht zu bringen und zu dokumentieren. Die während der Phase der Wissenserhebung anfallenden Daten werden als Wissensprotokolle bezeichnet. Sie sind einerseits verbaler Art (Texte aus Büchern, Manuals, Lexika, Interviewaufzeichnungen, Tonbandmitschnitte,...), können andererseits aber auch Zeichnungen oder Systemmodelle sein. Die Wissenserhebung verwendet experimental- und kognitionspsychologische Techniken, ist Aufgabe des „Knowledge Engineers“ und stellt zunächst eine reine, uninterpretierte Datensammlung dar. Eine Auswahl und Beschreibung spezieller Erhebungsmethoden findet sich in [61].

Daneben existieren für spezielle Problemstellungen entwickelte, rechnergestützte Wissensakquisitionswerkzeuge, die allerdings nicht mit den o.a. Techniken vergleichbar sind, da sie bereits von einem feststehenden Problemlösungsverfahren (z.B. Diagnose, Konfiguration oder Planung) ausgehen und keine intuitive Vorgangsweise des Wissensingenieurs mehr erlauben. Mit der steigenden Spezialisierung eines solchen Werkzeugs für ein Anwendungsgebiet nimmt seine Anwendungsbreite ab, mit sinkender Spezialisierung steigen die Anforderungen an den Benutzer. Manche Systeme haben die Einfachheit von Editoren und ermöglichen somit auch Nicht-Informatikern den komfortablen Aufbau einer ablauffähigen Wissensbasis für ein Fachgebiet. Andere Systeme bieten zusätzlich Analysefunktionen zur Kontrolle des eingegebenen Wissens. Ein Vergleich einiger dieser Werkzeuge findet sich ebenfalls in [61].

Die Qualität der Ergebnisse der Wissenserhebungsphase wird sehr wesentlich von einer Reihe von Faktoren beeinflusst. Dazu zählen neben anderen:

- **Motivation, Kompetenz, verbale Fähigkeiten des Experten,**
- **Vorwissen des Wissensingenieurs über das Anwendungsgebiet,**
(Vorsicht bei der Einschätzung, selbst Experte zu sein !)
- **Soziale, kommunikative und psychologische Fähigkeiten zur Interviewführung,**
(Vermeidung von Beeinflussungen des Experten, Interviewführung in der „Sprache“ des Experten)
- **Auswahl, Vorbereitung und schrittweises Vorgehen bei den Erhebungstechniken,**
- **Dokumentation und Auswertung der Ergebnisse.**

3.8 Werkzeuge zum Bau Wissensbasierter Systeme

Für die Entwicklung wissensbasierter Systeme steht mittlerweile ein großes Spektrum an Software-Werkzeugen zur Verfügung. Aufsteigend eingeteilt nach dem Grad ihrer Spezialisiertheit für eine bestimmte Problemstellung sind bei den Software-Werkzeugen vier Hauptgruppen zu nennen, deren Grenzen als fließend zu betrachten sind. Nähere Beschreibungen finden sich in [74]:

- **Programmiersprachen der Künstlichen Intelligenz (Common Lisp, Prolog,....),**
- **Wissensrepräsentationssprachen (OPS5, EMYCIN, KEE, BABYLON,...),**
- **Expertensystem-Shells ohne Basiswissen (TEST, MED2,...),**
- **Expertensystem-Shells mit Basiswissen (SYNTEL,...).**

Die Auswahl eines Werkzeugs für eine Anwendung ist grundsätzlich schwierig. Mit einer steigenden Spezialisierung verringert sich zwar der Entwicklungsaufwand, wird jedoch auch die eigene Gestaltungsmöglichkeit und die Eignung für das Einsatzgebiet eingeschränkt. Als wesentliche Kriterien bei der Auswahl sind Speicherplatzgrenzen, Offenheit der Architektur, Einarbeitungszeit, Hardwarevoraussetzungen und natürlich wirtschaftliche Faktoren (Preis, Support, Dokumentation,...) anzuführen. Unter dem Aspekt der Produktivität ist es ratsam, spezialisierte, am Markt erhältliche Werkzeuge nur dann auszuschließen, wenn sie für die Anwendung tatsächlich unbrauchbar erscheinen.

3.9 Die Eignung der Problemstellung und des Anwendungsumfelds für Entwicklung und Einsatz eines Wissensbasierten Systems

Aus den in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Grundlagen wissensbasierter Systeme (speziell Kapitel 3.2) wird deutlich, dass für eine Entwicklung und einen erfolgreichen Einsatz in der Praxis bestimmte Voraussetzungen erfüllt sein müssen. Die zu lösende Problemstellung aber auch das Anwendungsumfeld müssen theoretisch wie praktisch geeignet sein.

Für die vorliegende Problemstellung des automatischen Erkennens auffälliger Verschiebungsverläufe und das Anwendungsumfeld des Tunnelbaus nach der NÖT soll dies nun anhand der nachfolgenden Kriterienliste (Tabelle 1) untersucht werden. Die Liste umfasst 35 gewichtete Kriterien [aus 74], welche zwischen 0 (trifft nicht zu) und 10 (trifft optimal zu) bewerten und in notwendige und wünschenswerte Eignungskriterien unterteilt sind. Die Gesamtbewertung ergibt sich aus der gewichteten Summe aller Einzelbewertungen dividiert durch die Summe aller Gewichtungen und ist ebenfalls eine Zahl zwischen 0 und 10. Falls bei einem wichtigen Kriterium (Gewichtung >5) die Einzelbewertung relativ gering ist (<4), führt dies zur globalen Abwertung.

Die Bewertungszahlen in der angegebenen Tabelle stellen die Mittelwerte der Einschätzungen und Erfahrungen mehrerer interviewter Experten des Anwendungsgebietes dar. Im Anschluss an die Tabelle werden Begründungen für die einzelnen positiven und negativen Bewertungen angeführt.

Nr	Gewichtung	Kriterium	Bewertung
		Notwendige Kriterien	
1	10	Vom Systems erwartet man einen großen Nutzen im Routinebetrieb	10
2	10	Die Anwender haben realistische Erwartungen von Umfang und Grenzen des Systems	6
3	10	Die Entwicklung des Systems wird von den Anwendern unterstützt	8
4	10	Das Anwendungsgebiet erfordert keine Verarbeitung natürlicher Sprache	10
5	7	Das Anwendungsgebiet ist wissensintensiv, aber nicht zu groß	10
6	8	Das Anwendungsgebiet ist im wesentlichen heuristischer Natur	8
7	10	Testfälle/Testdaten aller Schwierigkeitsgrade sind verfügbar	9
8	7	Das System kann inkrementell wachsen (das Anwendungsgebiet ist aufteilbar)	10
9	10	Das Anwendungsgebiet erfordert kein oder kaum Allgemeinwissen	8
10	8	Die Anwender sind nicht mit einer derartigen Technologie überfordert	8
11	10	Das Anwendungsgebiet ist in absehbarer Zukunft noch relevant	8
12	8	Das Anwendungsgebiet ist einfach, aber nicht zu einfach für ein wissensbasiertes System	5
13	10	Es gibt einen/mehrere echte Experten	10
14	10	Der/die Experten stehen laufend zur Verfügung	3
15	8	Der/die Experten sind kooperativ	7
16	8	Der/die Experten können ihr Wissen formulieren	9
17	8	Der/die Experten sind zuverlässig und haben allgemeine Projekterfahrung	9
18	7	Es ist schwierig, aber nicht zu schwierig, das Expertenwissen zu vermitteln	8
19	10	Verschiedene Experten stimmen in der Problemlösung überein	9
20	10	Der/die Experten brauchen bei der Problemlösung nicht kreativ zu sein	10
21	10	Der/die Experten lösen das Problem nur mit kognitiven Fähigkeiten	10
		Wünschenswerte Kriterien	
22	4	Die Einführung in die Arbeitsumgebung erfordert keine größeren Umstellungen	8
23	4	Das System ist vom Benutzer konfigurierbar	6
24	4	Die Ergebnisse der Problemlösung können erklärt werden	9
25	4	Das System erfordert geringen Zeitaufwand für die Dateneingabe	3
26	4	Das Anwendungsgebiet war bereits früher als problematisch aufgefallen	8
27	5	Das Anwendungsgebiet erfordert nicht zu kurze Antwortzeiten	3
28	8	Es gibt erfolgreiche Systeme, die dem geplanten System ähneln	0
29	5	Das geplante System würde oft/mehrfach eingesetzt werden	10
30	3	Das Anwendungsgebiet ist für Menschen unattraktiv	0
31	4	Das Anwendungsgebiet enthält auch subjektives Wissen	8
32	3	Der/die Experten sind in der Zukunft nicht mehr verfügbar	0
33	4	Der/die Experten fühlen sich durch das Projekt nicht bedroht	7
34	4	Das Wissensgebiet verändert sich nicht rapid	9
35	8	Das Kosten-Nutzen Verhältnis des Systems ist im Anw.-gebiet vertretbar	8

Gesamtbewertung: 7.6

Tabelle 1: Bewertung von Kriterien zur Eignung eines wissensbasierten Systems im Anwendungsgebiet

3.9.1 Beurteilung der als problematisch bewerteten Aspekte

Insgesamt ergibt sich aus der Auswertung der Bewertungszahlen eine eher günstige Gesamteinschätzung (Wert: 7.6) der Eignung von Problemstellung und Anwendungsumfeld. Besonders zu beachten und eventuell problematisch werden jedoch die Kriterien 2, 12, 14, 25, 27, 28, 30 und 32 der obigen Tabelle beurteilt.

ad Kriterium 2

Das Leistungspotential wissensbasierter Systeme liegt zwischen dem von konventionellen Programmen und dem von menschlichen Experten. Es ist deutlich darauf hinzuweisen, dass vor allem in den Bereichen Lernfähigkeit und der Verarbeitung von Allgemein- und Hintergrundwissen (z.B., es kann keine zwei Messpunkte gleicher Position geben, Messpunkte können nicht „in der Luft“ liegen, etc.), nach derzeitigem Stand der Technik oft Schwierigkeiten auftreten. Bei der vorliegenden Problemstellung dürfte Allgemeinwissen allerdings nur in geringem Umfang eine Rolle spielen. Wird ein derartiges System außerdem lediglich als „Unterstützungssystem“ für den Experten ausgelegt, ist ein Versagen in bestimmten Fällen mitunter tolerierbar, da der Experte immer die letzte Entscheidung fällt.

ad Kriterium 12

Wissensbasierte Systeme eignen sich insbesondere bei Problemstellungen, in denen im Prinzip einfache, aber dennoch nicht allzu einfache Probleme zu lösen sind. Im vorliegenden Fall muss anerkannt werden, dass das Erkennen auffälliger Muster in Datenverläufen nur in begrenztem Umfang (bei eindeutigen Fällen) als einfaches Problem angesehen werden kann. In komplizierteren Fällen oder bei gleichzeitigem Vorliegen und Sich-Überlagern mehrerer Auffälligkeiten kann im Allgemeinen davon nicht mehr ausgegangen werden. Davon abhängig wird die Problemlösungsqualität (objektive Leistungsfähigkeit) und damit die effektive Nützlichkeit für den Endbenutzer beeinflusst. Ein System, welches lediglich die einfachsten Probleme zufriedenstellend löst, wird erfahrungsgemäß als wenig nutzbringend eingestuft, außer es vermag dies sehr viel schneller als ein Experte. Diesem Punkt ist somit besonderes Augenmerk zu widmen.

ad Kriterium 14

Für die Entwicklung eines wissensbasierten Systems ist man auf die laufende Mitarbeit eines/mehrerer Experten des Anwendungsgebietes angewiesen. Die Erfüllung dieses Kriteriums wurde im Rahmen dieser Arbeit als eher schwierig erachtet.

ad Kriterium 25

Die Verarbeitung der primären Ausgangsdaten (Verschiebungsmessungen) kann aufgrund ihrer digitalen Verfügbarkeit weitgehend automatisch erfolgen. Aufgrund der Tatsache jedoch, dass ein Großteil weiterer für die Analyse gegebenenfalls sinnvoller oder notwendiger Zusatzdaten (z.B. Stützmittel, Geologie) oft nicht in geeigneter digitaler Form verfügbar ist (siehe Kapitel 4), wird ein entsprechend höherer Aufbereitungsaufwand angenommen. Mit der Menge der aufzubereitenden Daten steigt der Arbeitsaufwand, aber auch die Leistungsstärke des Systems.

ad Kriterium 27

Die Antwortzeit sollte aus Akzeptanzgründen nicht länger als einige Minuten, auf keinen Fall aber länger als die durchschnittliche Arbeitszeit eines Experten sein. Bei der vorliegenden

Aufgabenstellung ist die Antwortzeit somit ein entscheidender Faktor für die Nützlichkeit des Systems.

ad Kriterium 28

Es konnten keine vergleichbaren, in der Praxis erfolgreichen, wissensbasierten Systeme ausfindig gemacht werden. Demzufolge ist bei einer derartigen Aufgabenstellung von einer gänzlichen Neuentwicklung auszugehen. Hinsichtlich Entwicklungsaufwand und Erfolgsrisiko bringt dies entsprechende Unsicherheiten mit sich.

ad Kriterium 30

Die Akzeptanz des Einsatzes wissensbasierter Systeme ist für unattraktive (oder gar für Menschen gefährliche) Aufgabenstellungen naturgemäß besonders gut. Im vorliegenden Fall trifft dies nur eingeschränkt zu; die Arbeiten können jederzeit (und sogar bequem im Büro) von menschlichen Experten auch weiterhin vorgenommen werden. Allerdings ist zu betonen, dass oftmals unter starkem Zeitdruck gearbeitet werden muss, wodurch die Tätigkeit unter praktischen Bedingungen fallweise unattraktiv ist.

ad Kriterium 32

Eine weitere Motivation wäre gegeben, falls in absehbarer Zeit keine oder kaum mehr Experten zur Verfügung stünden und damit das Vorhandensein eines Systems besonders wünschenswert wäre. Davon ist in der nächsten Zeit jedoch nicht auszugehen.

3.9.2 Beurteilung der positiv bewerteten Aspekte

ad Kriterium 1

Da bei größeren Tunnelprojekten Experten sehr viel Zeit für die tägliche Routinedurchsicht aller Daten aufbringen müssen, ist ein Werkzeug, welches diesen Zeitaufwand durch ein automatisches Erkennen auffälliger Daten zu verringern vermag, jedenfalls von Nutzen.

ad Kriterium 3

Die Entwicklung eines derartigen Systems wurde von einigen Experten in der Vergangenheit bereits selbst angedacht und motiviert. Aufgrund dessen und nicht zuletzt auch aufgrund wirtschaftlicher Überlegungen (Zeitersparnis) werden die Anwender das Vorhaben unterstützen.

ad Kriterium 4

Die Verarbeitung natürlicher Sprache stellt eine außerordentlich schwierige Aufgabe beim Aufbau wissensbasierter Systeme dar und erhöht das Risiko eines möglichen Scheiterns des Projekts. Im konkreten Anwendungsgebiet stellt sich diese Aufgabe nicht.

ad Kriterium 5

Bei der Analyse von Verschiebungsmessdaten kann von einem wissensintensiven Prozess gesprochen werden, da ein kompetenter Experte das Faktenwissen (Ausgangsdaten) unter Anwendung expliziten Spezialwissens bearbeitet. Dieses Spezialwissen im Anwendungsgebiet wird jedoch in Bezug zur Zielsetzung des wissensbasierten Systems nicht als zu umfangreich angesehen.

ad Kriterium 6

Für das Erkennen von Auffälligkeiten in den Verschiebungsmessdaten sind nur selten eindeutige Schwellwerte anzugeben. Die Frage, ab wann Datenverläufe signifikant auffällig sind, wird daher eher heuristisch und oftmals subjektiv beantwortet.

ad Kriterium 7

Es kann auf Datensätze vergangener Tunnelprojekte zurückgegriffen werden. Anhand dieser Daten und der darin enthaltenen und auch gut dokumentierten Auffälligkeiten kann das zu entwickelnde System eingehend getestet werden.

ad Kriterium 8

Das Wissen des Anwendungsgebietes kann schrittweise integriert werden. Denkbar wäre z.B. eine Vorgangsweise, bei der zunächst systematisch das einfachere oder auch das wesentlichere Wissen implementiert wird. Auch betreffend des Anwendungsgebietes selbst kann eine Unterteilung erfolgen, so kann z.B. zunächst das Wissen über tiefliegende Tunnelbauten formuliert und erst später jenes oberflächennaher Tunnel in Angriff genommen werden.

ad Kriterium 9

Allgemeinwissen spielt in gewissen Umfang beim Erkennen von Widersprüchlichkeiten oder sonstigen Unplausibilitäten der Ausgangsdaten eine Rolle (siehe auch Kriterium 2), im Anwendungsgebiet hat Allgemeinwissen aber ansonsten keine allzu große Bedeutung.

ad Kriterium 10

Eine weitgehend allgemein verständliche Benutzerschnittstelle sollte die ohnehin in der Bedienung von Computerprogrammen geschulten Experten nicht überfordern. Schon jetzt arbeiten Experten mit einfachen Werkzeugen zur Datenaufbereitung und Visualisierung.

ad Kriterium 11

Die Bedeutung einer kompetenten geotechnischen Analyse im Rahmen der NÖT ist heute unumstritten. Die dazu erforderlichen Verschiebungsmessungen werden bereits standardmäßig in nahezu jedem Bauprojekt nach der NÖT durchgeführt. Es werden Tunnel unter geotechnisch immer schwieriger werdenden Randbedingungen aufgefahren. Die Baumethode NÖT könnte jedoch gegenüber anderen, so z.B. maschinellen Verfahren in Zukunft an Bedeutung einbüßen.

ad Kriterium 13

Das Problemgebiet wird derzeit ausschließlich von Experten bearbeitet, welche in einigen wenigen Fachfirmen oder auch an Universitäten tätig sind. Österreichweit werden davon nur sehr wenige Personen als echte Experten eingeschätzt.

ad Kriterium 15

Siehe Kriterium 3.

ad Kriterium 16

Aus Gesprächen mit Experten wird ersichtlich, dass von deren Fähigkeit zur Wissensformulierung ausgegangen werden kann.

ad Kriterium 17

Die Experten weisen vielfach langjährige Projekterfahrung im Tunnelbau auf.

ad Kriterium 18

Das Wissen in Zusammenhang mit dem Erkennen von Auffälligkeiten kann auch in komplexeren Fällen allgemein verständlich formuliert und vermittelt werden. Es stehen diesbezüglich auch gut dokumentierte Beispielfälle zur Verfügung.

ad Kriterium 19

Die Kriterien hinsichtlich des Erkennens von Auffälligkeiten sind kaum umstritten. Lediglich die Frage, ab wann diese signifikant oder gar kritisch sind, wird oft unsicher beantwortet.

ad Kriterium 20

Kreativität im Sinne einer schöpferischen Konstruktion der Problemlösung durch das Finden neuer, unter Umständen noch nicht dagewesener Lösungswege oder -ansätze ist nicht gefordert.

ad Kriterium 21

Es sind neben den kognitiven keine z.B. motorischen oder sensorischen Fähigkeiten zur Problemlösung erforderlich.

ad Kriterium 22

Die Nutzung des Systems erfordert keine größeren Umstellungen für den Benutzer an seinem Arbeitsplatz (auf der Baustelle). Die benötigte EDV-Infrastruktur ist heute großteils vorhanden. Ein entsprechender Mehraufwand für den Benutzer im Bereich der Datenaufbereitung und Einrichtung des Systems ist allerdings zu berücksichtigen.

ad Kriterium 23

Die Möglichkeiten der Interaktion des Benutzers mit dem System umfassen neben der Datenaufbereitung insbesondere die nötige Konfiguration und Anpassung projektabhängiger Parameter (z.B. Angabe von Schwellwerten). Die Implementation neuen Wissens bleibt jedoch programmtechnisch dem Softwareingenieur in Zusammenarbeit mit den Experten vorbehalten.

ad Kriterium 24

Von seiten der Experten kann die Problemlösung, das heißt, warum bestimmte Verschiebungsverläufe als auffällig erkannt wurden, durchaus erklärt werden. In Form textlicher oder grafischer Ausgaben sollte dies daher auch dem wissensbasierten System möglich sein.

ad Kriterium 26

Aus den bereits in Kapitel 1 und 2 angeführten Nachteilen der bisherigen Vorgangsweise geht dies, auch aus Sicht der Experten, deutlich hervor.

ad Kriterium 29

Ein derartiges System könnte nicht nur für einige wenige, selten auftretende Anwendungsfälle sondern routinemäßig bei vielen Tunnelprojekten und daher oftmals verwendet werden.

ad Kriterium 31

Siehe Kriterium 6.

ad Kriterium 33

Wird bereits im Konzept des Systems davon ausgegangen, dass Experten nicht ersetzt sondern unterstützt werden sollen, so geht von dieser Frage nur eine geringe Gefahr aus.

ad Kriterium 34

Das bestehende zur Lösung der Problemstellung erforderliche Wissen wird als zeitlich kaum veränderlich eingestuft, auch eine rapide Zunahme des Wissens aufgrund neuerer Erkenntnisse im Wissensgebiet ist nicht zu erwarten.

ad Kriterium 35

Da das System Experten nicht ersetzen kann, stellt es einen zusätzlichen Kostenfaktor im Anwendungsgebiet dar. Fehlerhafte oder unvollständige Analysen überlasteter oder unerfahrener Experten bergen jedoch das Risiko hoher Folgekosten, womit positiv für diesen Punkt argumentiert werden kann. Die Kosteneinsparungen können, wie bei fast allen Sicherheits- und Vorsorgemaßnahmen, nicht exakt ermittelt werden.

3.10 Zusammenfassung

Wissensbasierte Systeme sind Programme, welche in geeigneten Anwendungsbereichen menschliche Experten bei der Lösung von Problemen unterstützen können. In den Bereichen Geodäsie und Geotechnik wurden bislang nur einige wenige Entwicklungen derartiger Systeme durchgeführt (Kapitel 3.2). Die tatsächlichen Fähigkeiten dieser Systeme sind auf enge Aufgabenstellungen begrenzt, ihr praktischer Nutzen ist lediglich für wenige Beispiele nachgewiesen und ausreichend dokumentiert.

Für Wissensrepräsentation, -herleitung und -erhebung existieren verschiedene Konzepte und Techniken (Kapitel 3.5, 3.6 und 3.7). Für die vorliegende Aufgabenstellung, also das automatische Erkennen auffälliger geodätischer Verschiebungsdaten im NÖT-Tunnelbau wird der regelbasierte Ansatz in Verbindung mit datengetriebener Inferenz (Vorwärts-Schließen) als vielversprechend erachtet; die Vorwärtsstrategie, da von einer großen Anzahl möglicher, zunächst allerdings noch völlig unbekannter Lösungen (Auffälligkeiten) auszugehen ist (Kapitel 3.6, Seite 29) und der regelbasierte Ansatz, da, wie aus dem nachfolgenden Kapitel 4 hervorgeht, das zugrunde liegende Analysewissen von Experten bereits vorwiegend in regelartiger Form artikuliert wird.

Desweiteren werden Problemstellung und Anwendungsumfeld (auch von entsprechenden Bereichsexperten) insgesamt als durchaus geeignet für Entwicklung und Einsatz eines wissensbasierten Systems beurteilt (Kapitel 3.9). Besonders sinnvoll erscheint es, ein derartiges System für die Überwachung von mit automatischen Messsystemen erfassten Messdaten einzusetzen, da aufgrund der gesteigerten Messhäufigkeiten eine wie bisher vorgenommene, manuelle Analyse unpraktikabel wird.

Für den Bau eines wissensbasierten Systems aber auch speziell für die Akquisition des zugrunde liegenden Wissens können am Markt erhältliche, wissensbasierte Softwaretools (*shells*) bis hin zu eigenen KI-Programmiersprachen genutzt werden. Bei Verwendung letzterer wird die flexible Anpassung an das Problem zwar mit einem erhöhten Entwicklungsaufwand erkaufte (Kapitel 3.8), da aber keine geeignete *shell* ausgeforscht werden konnte, ist dieser Weg zu beschreiten.

Ausgehend von diesen Überlegungen wird im nächsten Kapitel detaillierter auf die Ausgangslage, charakterisiert durch das tatsächlich verfügbare Fakten- und Analysewissen, eingegangen. Anhand einer systematischen Strukturierung dieser Wissensteile, der Angabe von Beispielen sowie einer Differenzierung der im Anwendungsgebiet typischen Analyseziele und -ergebnisse soll die Aufgabenstellung weiter konkretisiert werden. Es wird dabei an die Thematik speziell aus der Sicht wissensbasierter Verarbeitung herangegangen.

4. Wissensbasierte Analyse Geodätischer Verschiebungsmessungen

In den vorangegangenen Kapiteln wurden das Anwendungsgebiet und die Grundlagen wissensbasierter Systeme beschrieben. In diesem Kapitel soll das zur Analyse geodätischer Verschiebungsmessungen erforderliche Wissen charakterisiert werden. Zunächst werden hierfür die zugrundeliegenden Ausgangsdaten näher analysiert.

4.1 Charakterisierung der Ausgangsdaten - Faktenwissen

Als primäre Ausgangsdaten für die geotechnische Interpretation werden die in einem definierten Projektkoordinatensystem (Landessystem, Baustellensystem) vorliegenden räumlichen Koordinaten (y,x,H) von Messpunkten betrachtet, welche mittels geodätischer Mess- und Auswertemethodik (z.B. Freie Stationierung, Polare Aufnahme, Nivellement) zu diskreten Messzeitpunkten ermittelt werden. Hiervon abgeleitet sollen die in Bezug zu einer zugehörigen Tunnelachse stehenden, transformierten Koordinaten (Stationierung S , Querablage Q , Höhe über der Achse h) betrachtet werden.

Als im Rahmen dieser Arbeit sekundäre Ausgangsdaten werden die für die Analyse der primären Ausgangsdaten zusätzlich heranzuziehenden Daten und Informationen, unabhängig von der Art und Weise ihrer Nutzung im Interpretationsprozess, bezeichnet. Dazu zählen im Wesentlichen:

- Projekt-, Baugrund- und Bauwerkskenndaten aus der Tunnelplanungsphase (Trasse, Tunnelbautechnischer Rahmenplan, Statisch-Konstruktive Planung,...),
- Projekt-, Baugrund- und Bauwerkskenndaten aus der Bauausführungsphase (Baufortschrittsdaten, Vortriebsdaten, baugeologische Dokumentation,...),

Im folgenden wird eine Beschreibung qualitativer und quantitativer Merkmale dieser Daten vorgenommen und hinsichtlich wissensbasierter Verarbeitbarkeit beurteilt. Einige Datenarten werden anhand ausgewählter Beispiele von in der Praxis verwendeten Programm- bzw. Erfassungssystemen verständlich gemacht.

4.1.1 Primäre Ausgangsdaten - Verschiebungsdaten

1) Datenstruktur (gewähltes Beispiel: Software Dedalos, Fa. Geodata ZT GmbH)

Nach Auswertung der Rohmessdaten (Richtungen, Strecken) mittels geodätischer Auswertesoftware wird beim angegebenen Programmsystem für jeden beobachteten Verschiebungsmesspunkt für jede Messepoche ein Tupel der folgenden Struktur in einer relationalen Datenbank abgelegt:

00020 01 20011130 09 0 500885.98308 401752.84370 394.70825
--

Darin beschreiben:

00020	Stationierung des Messpunktes (Messquerschnitts) im Tunnel
01	Punktnummer des Messpunktes im Messquerschnitt
20011130	Datum der Messung
09	Uhrzeit der Messung
0	Index der Messung (0:Nullmessung, 1:aktive Folgemessung, 2:inaktive Folgemessung)
500885.98308	y-Koordinate des Messpunktes
401752.84370	x-Koordinate des Messpunktes
394.70825	Höhe des Messpunktes

Für ein Tunnelprojekt bestehend aus mehreren Vortrieben (Tunnelachsen) wird für jeden Vortrieb (für jede Tunnelachse) eine eigene Datenbank angelegt, in der die Daten aller Messepochen aller auf diese Achse bezogenen Verschiebungsmesspunkte abgelegt werden.

Aus diesen Daten können jederzeit die achsbezogenen Koordinaten (S,Q,h) berechnet und z.B. via ASCII-Export für eine wissensbasierte Weiterverarbeitung nutzbar gemacht werden.

2) Datenmengen, tägliche Datenraten

Unter der Annahme einer einmal täglichen Messung von 10 Messquerschnitten zu je 5 Messpunkten ergäbe sich ein tägliches Anwachsen der Datenbankgröße um 50 Tupel pro Tunnelachse. Unter den praxisnahen Annahmen eines Beobachtungszeitraumes von einem Monat pro Punkt, einer derzeit üblichen einmal täglichen Messung, eines mittleren Messquerschnittabstands von 10m und 5 Messpunkten pro Messquerschnitt ergeben sich pro km Tunnellänge ca. 15000 Tupel.

Im Falle des Einsatzes automatischer Messsysteme kann die tägliche Messhäufigkeit noch erheblich gesteigert werden. Ein Messsystem kann bei z.B. stündlicher Beobachtung von 50 Messpunkten ein tägliches Anwachsen der Datenmenge von bis zu 1200 Tupel liefern.

Hinsichtlich einer wissensbasierten Verarbeitung ist jedenfalls von einer handhabbaren Datenmenge auszugehen.

3) Genauigkeit

Unter Verwendung hochpräziser geodätischer Messausrüstung (Tachymeter, Reflektorsysteme) und strenger Einhaltung geometrischer Randbedingungen hinsichtlich der Beobachtungsanordnung (Messdistanzen, Punktconfiguration) kann fehlertheoretisch gezeigt werden, dass die Absolutkoordinaten der Messpunkte mit einer Genauigkeit im Sinne einer einfachen Standardabweichung von $\pm 1-2$ mm bestimmbar sind. In der Praxis werden allerdings eine Reihe genauigkeitsmindernder Störeinflüsse wirksam. Diese können zufällige oder systematische Verfälschungen der Messgrößen bis hin zu grob fehlerhafte Daten verursachen. Zu den wesentlichsten Einflussfaktoren zählen insbesondere physikalische Effekte (Refraktion), Justierfehler des Messinstruments (Höhenindexfehler), Aufstellungsunsicherheiten (Vibrationen,

Erschütterungen während der Messungen), Verschmutzung von Reflektoren, Verformungen im Bereich der als stabil angenommenen Festpunkte sowie Auswertefehler. Zusätzlich wird die Genauigkeit der Ergebnisse nicht unwesentlich von kaum quantifizierbaren Faktoren wie Erfahrung und Sorgfalt des Vermessers, individuellen Zielfehlern, dem Zeitdruck der Arbeiten, etc. beeinflusst. Die Erfahrungen bisheriger Projekte zeigen, dass unter durchschnittlichen Messbedingungen in der Regel die tatsächlich erzielten Koordinatengenauigkeiten bei ca. $\pm 1-3\text{mm}$ liegen, fallweise jedoch einzelne Messergebnisse zufolge nicht eliminiertes/eliminierbarer Störeinflüsse durchaus im Bereich weniger mm noch zusätzlich streuen können.

Eine Sonderform der Messung ist das Nivellement (vorwiegend bei übertägigen Setzungsmessungen), bei dem lediglich die Höhenkoordinaten von Messpunkten erfasst werden. Die praktisch erzielbaren Höhengenaugigkeiten liegen bei diesem Verfahren erfahrungsgemäß bei ca. $\pm 0.5-1\text{mm}$.

Für das Konzept einer wissensbasierten Verarbeitung bedingt die Genauigkeitsproblematik jedenfalls, dass die zugrundeliegenden Ausgangsdaten als unsicheres Faktenwissen (siehe dazu Kapitel 3.4) zu betrachten sind.

4) Zuverlässigkeit

Die Messung der Verschiebungspunkte erfolgt aus zeitlichen Gründen meistens unkontrolliert; das heißt, jeder Punkt wird durch einfache polare Messung ohne Überbestimmung erfasst. Die Messung mehrerer Sätze in beiden Kreislagen oder die Beobachtung der Punkte von mehreren Standpunkten aus stellen eher Ausnahmefälle dar. Lediglich die Bestimmung des Instrumentenstandpunktes erfolgt immer redundant nach dem Verfahren der Freien Stationierung ausgehend von Messungen zu mehreren bekannten Referenzpunkten. Im Sinne der Ausgleichsrechnung liefert die Messung (Richtung und Strecke) zu zwei Referenzpunkten bereits eine Gesamtredundanz von $r = 1$ für die Standpunktsbestimmung. Im Allgemeinen werden zumindest sechs oder mehr Referenzpunkte pro Standpunkt gemessen, woraus sich eine Gesamtredundanz von $r \geq 9$ ergibt. Die mit Hilfe der Ausgleichsrechnung ermittelbaren Standardabweichungen der Standpunktparameter (Koordinaten und Orientierungswinkel) dienen in der Praxis als Entscheidungshilfe für die endgültige Übernahme der Verschiebungspunktkoordinaten in die Datenbank. Das auf Seite 42 angegebene Beispiel (Abb. 22) eines Ausgleichsprotokolls verdeutlicht den Sachverhalt.

Aufgrund der beschriebenen, im Regelfall nicht redundanten Messung der Verschiebungsmesspunkte sind auch die Redundanzanteile dieser Beobachtungen Null. Das hat beispielsweise zur Folge, dass eine Aufdeckung grober Beobachtungsfehler mittels statistischer Methoden nicht möglich ist. Lediglich die Standpunktsbestimmung ist überprüfbar. Im Falle unerwarteter oder unplausibler Verschiebungen bestehen demzufolge in der Praxis lediglich die Möglichkeiten, nachfolgende Messungen abzuwarten oder sofortige Nachmessungen durchzuführen.

Die Zuverlässigkeiten von Nivellementergebnissen können demgegenüber bei korrekter Messweise (geschlossene Nivellements Schleifen) aufgrund der möglichen direkten Ergebniskontrolle durch den Schleifenschlussfehler vergleichsweise höher eingestuft werden.

BERECHNUNGSPROTOKOLL									
Station	In.H.	ys		xs		Hs		Or	
2000	0	7143.3136	34544.4532	221.9934	157.9743				
mo = 1.3 / r = 15		my 0.0007	mx 0.0001	mH 0.0001	mOr 0.0011				
RefId	Tg.H.	Hz	V	sD	vHz	pHz	vsD	vH	
201	0	37.4120	102.0810	47.5542	-2	-0.2	-0.4	-0.4	
202	0	35.8434	102.7636	35.5229	0	0.0	0.3	-0.2	
203	0	50.1462	101.9846	47.8832	8	0.6	0.7	0.5	
204	0	52.9109	102.4102	35.8929	1	0.1	0.0	0.2	
205	0	37.5154	96.3280	47.6012	4	0.3	0.5	0.0	
206	0	35.9635	94.9338	35.6529	-14	-0.8	-1.0	-0.1	
207	0	50.1355	96.5853	47.9502	-1	-0.1	0.0	0.2	
208	0	52.8333	95.3367	35.9749	4	0.2	-0.6	-0.1	
DefId	Tg.H.	Hz	V	sD	Ht				
1	0	235.8546	107.4950	13.5893					
		7142.0075	34557.8851	220.3972					

Erklärung:

In.H. : Instrumentenhöhe
ys, xs, Hs, Or : ausgeglichene Standpunktskoordinaten und -orientierung
mo : mittlerer Gewichtseinheitsfehler a posteriori
r : Gesamtredundanz
my, mx, mH, mOr : mittlere Fehler der Standpunktparameter
Tg.H. : Zielhöhe
Hz, V, sD : Beobachtungen
vHz, pHz, vsD, vH : Beobachtungsverbesserungen nach dem Ausgleich
yt, xt, Ht : berechnete Koordinaten des Verschiebungsmesspunktes

Abb. 22: Typisches Beispiel eines Ausgleichsprotokolls zur Standpunktsberechnung
(Quelle: Software Dedalos, Geodata ZT GmbH)

Aus der Sichtweise wissensbasierter Verarbeitung bestätigt sich wiederum die Forderung, die Ausgangsdaten als unsicheres Faktenwissen zu repräsentieren. Es wird dazu ein eher allgemeines Konzept zur Modellierung dieser Unsicherheit nötig sein, da im Zuge der Verarbeitung aus praktischen Gründen auf die Informationen der in einer Vielzahl einzelner Dateien gespeicherten Berechnungsprotokolle nicht mehr ohne überdimensionalen Aufwand zugegriffen werden kann. Eine Repräsentation individueller, auf die Einzelmessung bezogener Unsicherheiten ist zumindest auf Basis der Datenstruktur des gewählten Beispielprogramms nicht möglich.

5) Vollständigkeit

Unter der Voraussetzung verantwortungsvoll ausgeführter Messungen ist von der Vollständigkeit der Daten gemäß eines vorgegebenen Messprogramms im Regelfall auszugehen. In Einzelfällen können äußere Umstände (Verlust von Messpunkten durch Beschädigung, längere Behinderung der Messungen durch den Baubetrieb, Ausfall von Messinstrumenten oder Messpersonal, Auswerteschwierigkeiten) zu fehlenden bzw. unvollständigen Daten führen. Darüber hinaus werden projektabhängig an bestimmten Tagen (Wochenenden, Feiertagen) desöfteren trotz Baubetriebs keine Messungen ausgeführt.

Unvollständige oder fehlende Ausgangsdaten erschweren jedenfalls die Analyse. Ein Erkennen dieser Gegebenheiten durch das wissensbasierte System muss daher gewährleistet werden.

6) Verwertbarkeit, Brauchbarkeit

Ein wesentliches Qualitätsmerkmal ist die Brauchbarkeit der Ausgangsdaten für die weitere geotechnische Analyse. Unabhängig von den erzielten Genauigkeiten ist diese u.a. abhängig von:

- einer möglichst raschen/rechtzeitigen Vornahme der Nullmessungen nach Ausbruch,
- der Festlegung und Einhaltung eines entsprechend sinnvollen Messprogramms (Dichte des Messpunktrasters, Anordnung der Messpunkte, Messhäufigkeit) sowie
- der Häufigkeit, mit der die kontinuierliche zeitliche Verfolgung des Verschiebungsverlaufs ein und desselben Messpunktes aufgrund mechanischer Einwirkungen auf oder gar Beschädigungen der Vermarkung unterbrochen wird und demzufolge neue Nullmessungen vorzunehmen sind.

In diesem Zusammenhang muss erfahrungsgemäß projektabhängig von stark unterschiedlichen Brauchbarkeiten der Ausgangsdaten ausgegangen werden. Mittels geeigneter Prüfkriterien muss das wissensbasierte System demnach fähig sein, derartige Vorkommnisse zu melden.

7) Datenalter, -aktualität

Die Interpretation der aktuellen, zuletzt gemessenen Verschiebungsdaten erfolgt nach der bisherigen Vorgangsweise üblicherweise rasch nach Messung und Auswertung. Zwischen Erfassungszeitpunkt und Beendigung der Interpretation vergehen in der Praxis oftmals allerdings doch einige unter Umständen wertvolle Stunden.

Ziel des zu entwickelnden Systems ist es, insbesondere diesem Nachteil entgegenzuwirken und die Ausgangsdaten unmittelbar nach deren Vorliegen zu analysieren. Wie bereits erwähnt, wird dies für die Analyse von mit automatischen Messsystemen erfassten Daten von besonderem Interesse sein.

4.1.2 Sekundäre Ausgangsdaten

1) Projekt-, Baugrund- und Bauwerkskenndaten aus der Tunnelplanungsphase

Die Vornahme der geotechnischen Interpretation setzt die Kenntnis spezifischer Projektgegebenheiten und Randbedingungen voraus. Diese sind für den Experten in unterschiedlicher Weise für die Interpretation maßgeblich. Dazu zählen unter anderem Angaben über:

- den Verwendungszweck des Bauwerks (Straßen-, Eisenbahn-, U-Bahntunnel, Druckstollen,...),
- die geplante Trassenführung des Bauwerks (Achsgometrien, Überlagerungshöhen, Abstände zu anderen Bauwerken, Altlasten, Quellen, Schutzzonen, Grundwasserspiegeln, Einbauten,...),
- die Ergebnisse der Geomechanischen Planung (*Tunnelbautechnischer Rahmenplan*) (Geologische Prognose, Verteilung der erwarteten Gesteins- und Gebirgsarten sowie Gebirgsverhaltenstypen, Vortriebsklassen, Vorgaben für Ausbruch und Stützung, Vortriebsgeschwindigkeiten, Übermaß, erwartetes Ausbruchs- und Verformungsverhalten, Art und Umfang der messtechnischen Überwachung, der geforderten Messgenauigkeiten,...) und
- die Ergebnisse der Statisch-konstruktiven Planung (Abfolge, Form und Größe der Regelquerschnitte und Teilausbrüche, Anforderungen an die Stützmaßnahmen und Baumaterialien, Bautoleranzen, Maßnahmen bei Arbeitsunterbrechungen,...),

Diese Angaben entstammen der ingenieurmäßigen Tunnel-Gesamtplanung und umfassen eine Fülle von Parametern, welche zu Baubeginn vorliegen (sollten). In jedoch nur wenigen Fällen (z.B. Achsdaten, Regelquerschnittsdaten) sind sie heute außer in Papierform auch in geeigneter (direkt weiterverarbeitbarer) digitaler Form verfügbar. Manche dieser Angaben müssen zudem als unsicher eingestuft werden (z.B. die Prognose des Gebirges). Von besonderem Interesse für die geotechnische Interpretation ist, dass konkrete Anforderungen an das zulässige Verformungsverhalten (z.B. Setzungsgrenzwerte bei der Unterfahrung von Gebäuden, Gasleitungen, Verkehrswegen,...) bzw. auch Angaben über das prognostizierte Verformungsverhalten vorgegeben sein können. Um dieses Projekt-, Baugrund- und Bauwerkswissen einem wissensbasierten System zuzuführen, sind geeignete Benutzerdialoge (Eingabemasken) und Schnittstellen zur automatischen Datenübernahme notwendig.

2) Projekt-, Baugrund- und Bauwerkskenndaten aus der Bauausführungsphase

Von fundamentaler Bedeutung für die Analyse der Verschiebungsmessungen sind die im Zuge der Bauausführung laufend übermittelten Daten und Informationen wie beispielsweise:

- Baufortschrittsdaten (tatsächlicher Ort und Geschwindigkeit der Vortriebe, Bauunterbrechungen, -stillstände,...),

- Vortriebsdaten
(Einbauort, -zeitpunkt sowie Art und Menge der tatsächlich eingesetzten Stütz- und Sicherungsmittel wie Ausbaubögen, Spritzbeton, Bewehrung, Vorpfändmittel, Anker, Injektionen, Pfähle, etc., Dokumentation von Ort und Zeit der einzelnen Arbeitsabläufe,...)
- Änderungen in der Trassenführung,
(erfolgt nur in besonderen Ausnahmefällen)
- Änderungen der Geomechanischen Planung auf Basis der tatsächlich angetroffenen Gebirgsverhältnisse (*Fortschreibung des Tunnelbautechnischen Rahmenplans*),
- Änderungen der Statisch-konstruktiven Planung,
- Daten der baugeologischen Dokumentation,
- Ergebnisse anderer, nicht geodätischer Überwachungsmessungen sowie
- sonstige Vorkommnisse
(besondere Ereignisse wie Verbrüche, Rissbildungen, Beobachtungen vor Ort, Schwierigkeiten bei den Messungen,...).

Im folgenden sollen einige dieser Daten näher betrachtet und Beispiele angeführt werden.

Baufortschrittsdaten

Die Baufortschrittsdaten eines Projekts beschreiben den Fortschritt der Ausbruchsarbeiten anhand der Ortsbrustpositionen der jeweiligen Vortriebe bzw. deren Bauphasen (z.B. Kalotte, Strosse, Sohle) zu diskreten Zeitpunkten. Aus den Daten sind Ort, Richtung und Geschwindigkeit des Vortriebs ableitbar. Darüber hinaus kann daraus unter Berücksichtigung weiterer sekundärer Daten das Herannahen kritischer Bereiche (Durchschlagpunkt, Hohlräume, Schächte, Bauphasen parallel verlaufender Tunnel, Quellen,...) ersehen werden. Diese Informationen sind für die Beurteilung der Verschiebungen von Messpunkten, welche sich im Einflussbereich der Ausbruchsarbeiten befinden, wichtig (z.B. im Falle des erneuten Anwachsens der Verschiebungen zufolge des Herannahens/Durchgangs nachfolgender Bauphasen). Beispielsweise werden im Programm Dedalos (Geodata ZT GmbH) diese Daten gemäß folgender Struktur in einer relationalen Datenbank abgelegt:

20010307 10 195.5 63.0 0.0

mit:

20010307	Datum der Messung bzw. Erfassung
10	Uhrzeit der Messung bzw. Erfassung
195.5	Tunnelmeter der Bauphase 1 (z.B. Kalotte)
63.0	Tunnelmeter der Bauphase 2 (z.B. Strosse)
0.0	Tunnelmeter der Bauphase 3 (z.B. Sohle)

Die Anzahl der Werte (Zeilenlänge) eines solchen Tupels ist von der Anzahl der Bauphasen abhängig. Für ein Tunnelprojekt bestehend aus mehreren Vortrieben (Tunnelachsen) wird für jeden Vortrieb (für jede Tunnelachse) eine eigene Datenbank angelegt, in der die Vortriebsstände aller der Achse zugeordneten Bauphasen gespeichert werden.

Die Vortriebsstände werden entweder im Zuge von Vermessungsarbeiten direkt durch tachymetrische Messung eines Punktes an der Ortsbrust oder auch nur von den Baumannschaften mittels einfacher Hilfsmittel bestimmt (z.B. mittels Maßband ausgehend von Tunnelmetermarkierungen, aus der Anzahl und dem Abstand der Ausbaubögen). Davon abhängig schwankt die Erfassungsgenauigkeit zwischen 1 cm und einigen dm. Aus Gründen der Definitionsunsicherheit (Unebenheit der Ortsbrust) werden die Daten sinnvollerweise nur mit dm-Genauigkeit weiterverarbeitet.

Die Bestimmung erfolgt im Allgemeinen unkontrolliert und ohne großen Aufwand. Fallweise treten bei Verwendung einfacher Hilfsmittel Fehler in der Größenordnung mehrerer dm oder selten weniger m auf (z.B. bei nicht exakt eingehaltenen Abständen der Ausbaubögen, bei der Bestimmung in engen Kurven).

In Zusammenhang mit der Analyse von Verschiebungen ist vor allem die korrekte Erfassung der Vortriebsstände zum Zeitpunkt der Nullmessung von Messquerschnitten wichtig, da diese Werte zur Ermittlung der sogenannten „Vorverformungen“ notwendig sind. Hierunter versteht man jene praktisch unmessbare, aber theoretisch ermittelbare Verschiebung, welche bereits vor der Nullmessung eines Punktes stattgefunden hat.

Aufgrund ihrer digitalen Verfügbarkeit können diese Daten direkt als Faktenwissen einem wissensbasierten System zugänglich gemacht werden. Analog zu den Verschiebungsdaten ist auch für diese Daten von einer handhabbaren Menge auszugehen.

Vortriebsdaten (Dokumentation der Arbeitsabläufe, des tatsächlichen Stützmittelverbrauchs)

Da die Verschiebungsmessungen nicht zuletzt der Festlegung der Art und Menge der erforderlichen Stützmittel bzw. der Überprüfung ihrer Wirksamkeit dienen und umgekehrt die Stützung Einfluss auf das Gebirgsverformungsverhalten hat, ist die Kenntnis der Stützmitteldaten in der Umgebung von Messpunkten relevant. Der Einbau der Stützmittel hat gemäß den Vorgaben der Tunnelbautechnischen Rahmenplanung zu erfolgen und ist laufend zu dokumentieren. Darüber hinaus ist für die Interpretation grundsätzlich von Interesse, welche bautechnischen Tätigkeiten wann und wo erfolgt sind.

Die Vortriebsdaten werden stationierungsbezogen in Vortriebsberichten (Tabellen, Listen) von den Baumannschaften täglich handschriftlich aufgezeichnet und in vielen Projekten anschließend auch für Dokumentations-, Qualitätsmanagement- bzw. Abrechnungszwecke computerunterstützt weiterverarbeitet. Hierfür kommen zumeist eigene Abrechnungs- oder einfache Tabellenkalkulationsprogrammen zur Anwendung. Fallweise werden derartige Formblätter gescannt, bei manchen Tunnelprojekten werden die Daten auch bereits zum Zwecke geologisch-geotechnischer Spezialauswertungen in eigenen Datenbanken abgelegt [11,12]. Menge und Art dieser Daten ist aus dem Beispiel eines Vortriebsberichtsprotokolls (Abb. 23) ersichtlich.

Porr Technobau AG		VORTRIEBESBERICHT												Datum:															
Semmering Basistunnel Pilotstollen		von Station		bis Station		=		m/Tag		Polier:																			
BAS	Tätigkeit	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	22-23	23-24	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6				
	Drittel																												
10	Rüsten BW																												
11	Bohren																												
12	Laden, Sprengen																												
13	Erkundungsbohrungen																												
14	Wartezeit																												
20	Rüsten ITC																												
21	Schüttern, Reiben, Baggern																												
22	Sohle auffüllen																												
30	Rüsten Sicherungsarbeiten																												
31	Baustahlgitter																												
32	Stahlbogeneinbau																												
33	Spritzbeton																												
34	Ankern																												
35	Vorausicherung																												
36	Wasserhaltung																												
37	Kies-, Zement nachfüllen																												
38	Vorsohle spritzen																												
40	Sohle putzen																												
51	Versorgungsleitungen																												
52	Firstförderbandvorbau																												
53	Berwasserleitungen																												
61	Bergwasserleitung																												
71	Geräteausfall																												
72	Gleisehaltung																												
73	Sonstige Arbeiten																												
74	E-Versorgung, -arbeiten																												
76	Sonstige U/Teile																												
Anmerkungen:																													
Station		von		bis		Wasserleitung 20m hinter Ortsbrunn		SprSt.		Zünd.		Bohri.		Anker		Spieße		Bögen		Bstg		SPB		m²		m²			
						5-10 10-20 20-30 >30		kg		Stk		lfm		Typ/Lg/Stat. Stk		Typ/Lg/Stat. Stk		Nr.		Lagen		Zählerst.		m²		m²			
1																													
2																													
3																													
4																													
5																													
6																													

Abb. 23: Exemplarisches Beispiel eines Vortriebsberichts (Quelle: Fa. Porr Technobau AG)

Die Vortriebsdaten sind wie ersichtlich im Prinzip von eher einfacher Struktur. Für die Stützmitteldaten existieren zudem noch genormte Berechnungsschemata, die eine Zuordnung bestimmter Kennziffern für jeden Abschlag ermöglichen (z.B. 2. Ordnungszahl). Die Daten sind im Allgemeinen jedoch nicht durchgängig digital verfügbar. Selbst bei digitaler Verfügbarkeit ist die Art der Speicherung und somit die Benutzbarkeit als Faktenwissen in einem wissensbasierten System höchst unterschiedlich. Daten, die in Berichten auftauchen, können nicht ohne zusätzlichen Aufwand automatisch in ein derartiges System einfließen. Die Definition entsprechend geeigneter Schnittstellen ist hierfür wiederum erforderlich.

Daten der baugeologischen Dokumentation

Die im Zuge des Baufortschritts gewonnenen baugeologischen Daten werden ebenso für die Interpretation der Verschiebungen genutzt. Sie umfassen beschreibende, numerische und grafische Angaben und werden vor Ort (bei der Ortsbrust) in stationsbezogene, baugeologische Aufnahmeprotokolle zunächst handschriftlich eingetragen/gezeichnet und nachträglich eventuell digital weiterverarbeitet [11,12]. Ebenso existieren digitale, photogrammetrische Aufnahmeverfahren [34] zur Unterstützung der laufenden Ortsbrustdokumentation. Die in den Aufnahmeprotokollen aufgezeichneten Daten umfassen:

- deklarative Angaben
(z.B. Gesteinsart, -zustand, -farbe, sonstige Anmerkungen,...),
- geschätzte oder gemessene, numerische Parameter
(z.B. Trennflächenorientierungen, Kluftkörpergrößen, Bergwasserzutrittsmengen, Pegelstände,...) und
- grafische Darstellungen
(geologische Ortsbrustskizzen, Gefügedarstellungen).

Bei der Erfassung werden bereits spezifische, teilweise genormte Klassifikationsschemata angewendet, welche die Zuordnung der Daten zu Klassen vorgeben (z.B. für Bergwasser: trocken – feucht – tropfend – rinnend, für den Gebirgstyp gemäß ÖNORM). Menge und Art der Daten sind aus nachfolgendem Beispiel eines Datenblatts einer baugeologischen Ortsbrustaufnahme (Abb. 24 auf Seite 49) und einer von Hand skizzierten, grafischen Ortsbrustaufnahme (Abb. 25 auf Seite 50) ersichtlich.

Zusätzlich zu den unmittelbar vor Ort regelmäßig erfassten Daten zählen Ergebnisse stichprobenartiger, labortechnischer Untersuchungen zur Ermittlung boden- und felsmechanischer Eigenschaften wie Druck- und Scherfestigkeit, Wasserdurchlässigkeit und -gehalt, Korndichte und –größenverteilung, Reibungswinkel und Kohäsion, etc. Die Ergebnisse sind entsprechenden Versuchsberichten zu entnehmen.

Die Repräsentation baugeologisch – geotechnischer Daten als Fakten in einem wissensbasierten System ist für bereits klassifiziert erhobene Angaben wie z.B. die Menge des Bergwassers, welche mittels vier Adjektiven (trocken, feucht, tropfend, rinnend) quantifiziert wird (Abb. 24), einfach möglich. Ungleich schwieriger ist jedoch die Repräsentation grafischer Dokumente wie z.B. Ortsbrustskizzen (Abb. 25) zu bewältigen.

















		SEMMERING BASISTUNNEL - PILOTSTOLLEN BAUGEOLGISCHE ORTSBRUSTAUFNHME DATENBLATT				Lfd. Nummer: 3																																									
VOTRIEB	Datum: 07.12.1994	Uhrzeit: 15:00	Station: 5,00	Typ: Kalotte																																											
	GKL:	Abschlagslänge:	Art:	Bearbeiter: Ka.																																											
	Bohrlochanzahl:	Sprengstoff (Abschlag/Brust):																																													
	Profilmaßhaltigkeit (Brust): <input type="checkbox"/> sehr gut <input type="checkbox"/> gut <input type="checkbox"/> mittel <input type="checkbox"/> schlecht <input type="checkbox"/> keine																																														
GESTEIN	Lithologie:	Prozent(%)	Farbe:	Zustand:																																											
	Dolomitmarmor																																														
	Hangschutt																																														
	σ_c (Mpa) <input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 5-10 <input type="checkbox"/> 10-25 <input type="checkbox"/> 25-50 <input checked="" type="checkbox"/> 50-100 <input type="checkbox"/> 100																																														
TRENNFLÄCHEN																																															
Typ	Orientierung	Welligkeit			Unebenheit			Füllung und Bestege	Öffnung (cm)	Zerlegung			Position																																		
		stufig	well.	eben	rauh	glatt	pol.			Abstand (cm)	Ausbißl. (m)	T.I.																																			
SF				X	X			schluffig		50,00	10,0	A.-A	L Ulme+r. Ulme																																		
K				X	X			schluffig																																							
KLUFTKÖRPERVERBAND								<table border="1"> <tr> <th>Form der Kluffkörper (Ømittel, cm)</th> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>Poly.</td> </tr> <tr> <td>>50</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>50-20</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>X</td> <td></td> </tr> <tr> <td><20</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Mylonit</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>					Form der Kluffkörper (Ømittel, cm)						Poly.	>50							50-20					X		<20							Mylonit						
Form der Kluffkörper (Ømittel, cm)						Poly.																																									
>50																																															
50-20					X																																										
<20																																															
Mylonit																																															
<input type="checkbox"/> Trennflächen <input checked="" type="checkbox"/> Trennflächen teilweise offen <input type="checkbox"/> Trennflächen überwiegend offen																																															
VERWITTERUNG	<input type="checkbox"/> unverwittert, frisch		<input type="checkbox"/> Trennflächen verfärbt		<input checked="" type="checkbox"/> Gestein verfärbt, tw. entfestigt		<input type="checkbox"/> Gestein deutlich entfestigt																																								
BERGWASSER	<input checked="" type="checkbox"/> trocken		<input type="checkbox"/> feucht		<input type="checkbox"/> tropfend		<input type="checkbox"/> rinnend																																								
ENTSPANNUNGS-ERSCHEINUNGEN	<input checked="" type="checkbox"/> keine		<input type="checkbox"/> vereinzelt an den Klüften		<input type="checkbox"/> an den Schieferungsflächen		<input type="checkbox"/> an den gesamten Trennflächen																																								
BEMERKUNG Lithologie auch Hangschutt und Bachgeschiebe																																															

Abb. 24: Datenblattbeispiel einer baueologischen Ortsbrustaufnahme (Quelle: HLAG)

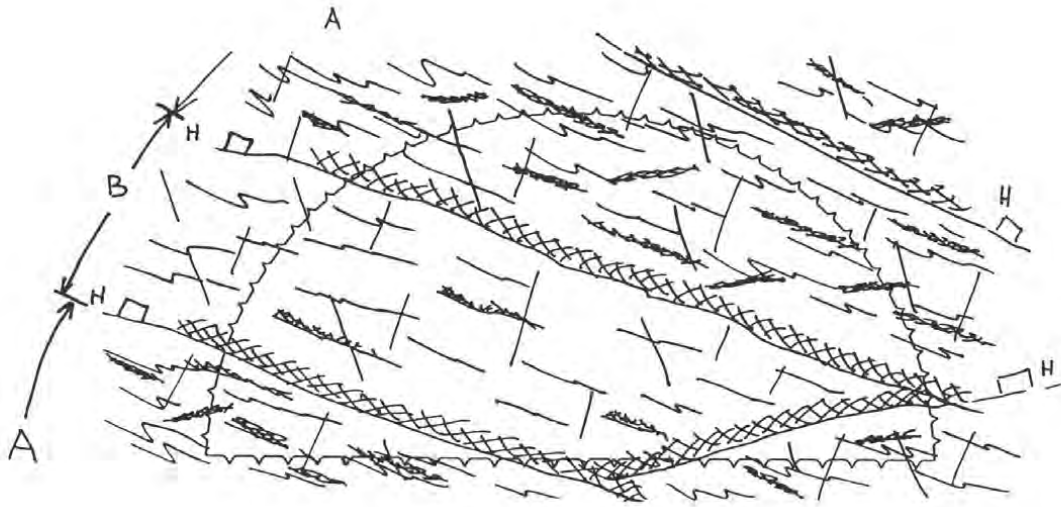


Abb. 25: Ortsbrustaufnahme mit den maßgeblichen geologischen Strukturen, über die Tunnellaibung hinaus extrapoliert (Quelle: ÖGG)

Ergebnisse anderer, nicht geodätischer Überwachungsmessungen

Sind in der näheren Umgebung von Verschiebungsmesspunkten zusätzliche geotechnische Messeinrichtungen vorhanden (z.B. bei untertägigen Hauptmessquerschnitten), so sind im Sinne einer kompletten und kompetenten Analyse deren Messwerte gemeinsam mit den Verschiebungsdaten zu analysieren. Verwertbar sind hierfür beispielsweise die Daten von untertägig im Tunnelbau standardmäßig eingesetzten Sensoren wie:

- Extensometer,
- Gebirgsdruckdosen,
- Ankerkraftmessteller,
- Gleitmikrometer,
- Spritzbetondehnungsgeber.

Fallweise zur Verfügung stehen auch die Ergebnisse speziellerer Messverfahren (z.B. seismische Messungen an der Ortsbrust, Erfassung von Veränderungen an Rissen, Klüften, Spalten, Fugen, etc.). Weitere Aufschlüsse geben vorwiegend im übertägigen Bereich eingesetzte Sensoren wie:

- Bohrlochsonden (Inklinometer, Deflektometer, Extensometer),
- Schlauchwaagen, automat. Nivelliere,
- automatische Neigungsgeber.

Strukturen, Mengen und auch die digitale Verfügbarkeit der mit Hilfe dieser Messeinrichtungen gewonnenen Daten sind naturgemäß höchst unterschiedlich. Ihre Benutzbarkeit als Faktenwissen im wissensbasierten System erfordert eine geordnete Datenübernahme (automatisch oder durch manuelle Eingaben) über entsprechende Schnittstellen.

4.2 Zusammenfassende Bewertung der Ausgangsdaten

Die in Kapitel 4.1.1 beschriebenen primären Ausgangsdaten sind als „hartes Wissen“ zu betrachten. Sie sind bezugnehmend auf die schon diskutierten Aspekte Genauigkeit und Zuverlässigkeit als unsicheres Faktenwissen zu interpretieren. Unter den erwähnten Randbedingungen einer einmal täglich oder auch öfters (mit automatischen Messsystemen) durchgeführten Messung einer zahlenmäßig begrenzten Anzahl von Messpunkten ist von einer handhabbaren Datenmenge auszugehen. Wie aus Kapitel 2.3.3 ersichtlich, wird eine Vorverarbeitung dieser Daten notwendig, da die Interpretation auch von diesen Ausgangsdaten abgeleitete Werte (Geschwindigkeiten, Differenzen, Verhältnisse von Verschiebungen) umfasst.

Aus Kapitel 4.1.2 wird deutlich, dass ein großer Teil der sekundären Ausgangsdaten von heterogener und komplexer Natur ist. Für die Verwendung in einem wissensbasierten System erweisen sich insbesondere handschriftlich verfasste Berichts- oder Bilddokumente als problematisch. Einige der sekundären Ausgangsdaten sind prinzipiell vage, so z.B. Prognosen über die Geologie. Andere Daten hingegen, so z.B. die erwähnten Baufortschritts- und Vortriebsdaten, sind aufgrund ihrer einfacheren Struktur ohne großen Aufwand als Faktenwissen nutzbar. Für die Daten gegebenenfalls vorhandener, anderer geotechnischer Messeinrichtungen mag dies teilweise ebenso gelten. Die Vorbedingung geeigneter digitaler und auch zeitgerechter Verfügbarkeit der sekundären Ausgangsdaten wird jedoch insgesamt gegenwärtig großteils nicht erfüllt. Die zentrale und digitale Verwaltung aller projektrelevanten Baustellendaten bleibt, trotz bereits laufender Entwicklungsvorhaben auf diesem Gebiet noch Zukunftsmusik. Ungeachtet dessen wird in der vorliegenden Arbeit zumindest konzeptionell die Verwendung einiger dieser Daten berücksichtigt.

4.3 Charakterisierung des Analysewissens

Die im vorigen Kapitel angeführten primären und sekundären Ausgangsdaten bilden das Faktenwissen im Interpretationsprozess. Aus den primären Ausgangsdaten werden die in Kapitel 2.3.3 beschriebenen grafischen Darstellungen hergestellt. Zu deren Analyse ist die Kenntnis der sekundären Ausgangsdaten maßgeblich. Im folgenden wird jenes Wissen aufbereitet, welches von entsprechenden Bereichsexperten zur Vornahme der Analyse angewandt wird:

1) Herkunft, Zugreifbarkeit des Wissens

In den letzten Jahren wurden von Fachleuten eine Reihe von Veröffentlichungen [27 – 31] getätigt, aus denen, basierend auf gesammelten Projekterfahrungen im Tunnelbau, gewisse Richtlinien zur Interpretation bestimmter Verschiebungsverläufe bzw. -muster ableitbar sind. Es wird darin, auch anhand von Fallbeispielen, beschrieben, in welcher Weise sich das Verhalten des Systems Ausbau – Gebirge in den Verschiebungsmessdaten widerspiegeln kann und in welchen grafischen Darstellungsformen dies am ehesten erkennbar wird. Aussagewert und Grenzen der Schlussfolgerungen werden diskutiert. Diese Erkenntnisse können quasi als nötiges Grundwissen für die Analyse angesehen werden. Sie werden zudem im Rahmen von Speziallehrveranstaltungen und Fortbildungslehrgängen der Fachrichtungen Geologie und Bauingenieurwesen vermittelt. In den allermeisten Fällen stammen die mit der Interpretation befassten Spezialisten hinsichtlich ihrer Ausbildung auch aus diesen Fachgebieten. Darüber hinaus stammt das angewandte Wissen jedoch auch zu einem nicht unbeträchtlichen Teil aus persönlichen, unveröffentlichten Projekterfahrungen verschiedener Experten, welche nur mittels entsprechender Erhebungstechniken [61] zugänglich gemacht werden können.

2) Arten des für die Analyse angewandten Wissens

Mit Bezug auf Kapitel 3.4 werden für das vorliegende Anwendungsgebiet folgende Wissensarten als wesentlich erachtet:

- **öffentliches, projektunabhängiges Fachwissen**

Hierunter ist alles Wissen einzuordnen, welches Experten im Rahmen ihrer Berufsausbildung erhalten und auch direkt aus den beschriebenen Veröffentlichungen des Fachgebietes entnommen werden kann. In diesen sind heute insbesondere Angaben darüber dokumentiert, welche grafischen Darstellungsformen der Verschiebungen von Nutzen sind und welche Aussagen aus diesen abgeleitet werden können (siehe auch Kapitel 2.3.3). Geltend für die in diesen Publikationen angeführten Beispielfälle werden das erwartete Verschiebungsverhalten oder Normalbereiche von Verschiebungen angeführt und tatsächlichen Messdaten gegenübergestellt. Zusammenhänge mit der Geologie bzw. mit anderen sekundären Daten werden erörtert. Im Speziellen sind es relative Aspekte, also zeitliche oder räumliche Änderungen des Verschiebungsverhaltens, aus denen sich generelle und projektunabhängige Basiskriterien zur Aufdeckung auffälliger Entwicklungen ableiten lassen.

Das Fachwissen ließe sich in folgender, an Allgemeinheit kaum mehr zu übertreffender, heuristischer Aussage zusammenfassen:

„Wenn sich dieses oder jenes Verschiebungsbild unter bestimmten Voraussetzungen zeigt, so gilt, dass es als normal oder auffällig zu beurteilen ist.“

Für derartige, quasi als Regeln formulierbare Aussagen gilt, dass sie auf gewissen Vorbedingungen („unter bestimmten Voraussetzungen“) aufbauen. Diese setzen sich beispielsweise aus Teilen der sekundären Ausgangsdaten zusammen, welche konjunktiv („und“) oder disjunktiv („oder“) verknüpft sein können. Auch Negationen („nicht“) können darin auftreten. Ein einfaches, auch für den Laien verständliches Beispiel hierzu könnte lauten:

„Wenn ein Messpunkt nach Abklingen seiner Verschiebungen (z.B. der Setzungen) zu einem späteren Zeitpunkt wieder eine signifikante Verschiebung (Setzung) aufweist, so ist dies auffällig.“

*Vorbedingungen: es handelt sich nicht um einen Messfehler oder
es nähert sich nicht eine nachfolgende Bauphase (Strossenvortrieb)
- ist aus den Sekundärdaten (Vortriebsdaten) ersichtlich.*

(siehe auch Kapitel 2.3.3 Abb.8)

Weitere Vorbedingungen oder eine andere Art der Formulierung könnten natürlich gefunden werden.

Gewisse Plausibilitätsaussagen können ebenfalls so oder so ähnlich formuliert werden:

„Wenn ein Messpunkt keinerlei Verschiebungen zeigt, so ist dies auffällig.“

*Vorbedingungen: die umgebenden Messpunkte zeigen Verschiebungen oder
es werden signifikante Verschiebungen erwartet und
die Messungen wurden nicht zu spät begonnen.*

Ein weiteres Beispiel illustriert bereits einen etwas komplizierteren Fall:

„Wenn sich die räumliche Orientierung der Verschiebungsvektoren mit fortlaufendem Vortrieb ändert, so ist dies auffällig.“

(siehe auch Kapitel 2.3.3 Abb.11)

Gewisse Grundannahmen scheinen universell anwendbar zu sein (Hintergrundwissen):

„Wenn gleiche äußere Bedingungen vorliegen, so wird auch ein gleichartiges Verschiebungsverhalten der Messpunkte erwartet.“

Das als solches bezeichnete öffentliche, projektunabhängige Fachwissen kann als allgemein gültig und anerkannt, muss aber vor allem auch als ungenau aufgefasst werden, da beispielsweise zunächst keinerlei Angaben darüber gemacht werden, wie groß der räumliche und zeitliche Einflussbereich einer sich nähernden Bauphase anzusetzen ist.

Auch wird nichts darüber ausgesagt, wie stark die erneut auftretenden Setzungen sein müssen, um tatsächlich als auffällig zu gelten bzw. ab welcher Größenordnung eine räumliche Orientierungsänderung der Verschiebungsvektoren auffällig wird. Desweiteren handelt es sich, wenn von „Auffälligkeit“ die Rede ist, je nach Definition, um das Vorliegen eines unscharfen oder scharfen Begriffes. Man hat quasi beim Design eines wissensbasierten Systems zu entscheiden, ob man „Auffälligkeit“ besser scharf (als eindeutige Unterscheidung ja oder nein, anhand einer Skala) oder unscharf (z.B. mit Fuzzy-Methoden) modellieren möchte. Je nach Fragestellung kann die eine oder andere Sichtweise adäquater sein.

- **öffentliches, projektspezifisches Fachwissen**

Dieses Wissen ist nötig, um, im Gegensatz zu oben, all jene Aussagen abzuleiten zu können, welche für ein Projekt zur Interpretation der auftretenden Verschiebungen aufgrund „externer“ Vorgaben *unbedingt* abzuleiten sind. Diese öffentlichen, weil nachlesbaren Vorgaben können zum Beispiel der tunnelbautechnischen Rahmenplanung entstammen, in welcher der Planer auf Basis theoretischer Vorausberechnungen von Prognosewerten (z.B. mit Hilfe numerischer Simulationen basierend auf Finite Elemente Methoden) das zu erwartende Verformungsverhalten in den unterschiedlichen Gebirgsbereichen beschreibt. Derartige Prognosen können beispielsweise wie folgt lauten:

„Innerhalb des Gebirgstyps A1 wurden für die zu erwartenden Endwerte der Firstsetzungen x cm vorausberechnet.“

Diese Aussage lässt den Schluss zu, dass größere Endbeträge der Firstsetzungen als auffällig und mit geotechnischen Modellvorstellungen unvereinbar angesehen werden, wobei die Evidenz der Auffälligkeit bzw. Modellunvereinbarkeit naturgemäß mit größer werdender Abweichung vom prognostizierten Wert steigt. Der Wert selbst kann in die Gruppe des Faktenwissens eingeordnet werden. Die Aussage, dass sich im Falle einer Abweichung von diesem eine Auffälligkeit ergibt, lässt sich jedoch besser als Regelwissen formulieren. Ergebnisse komplexerer Prognosen liefern heute im Gegensatz zu diesem mit Absicht simpel gehaltenen Beispiel statt Einzelwerten bereits auch ganze zeitabhängige Verformungskurven oder querschnittsbezogene Vektormuster (Kap. 5.4.2).

Desweiteren können konkrete und verbindliche Aussagen beispielsweise unter Berücksichtigung etwaiger Vorgaben aus Belastbarkeitsberechnungen oder Sicherheitsvorschriften herzuleiten sein:

„Wenn die Querverformungen der Messpunkte an den obertägigen Gleisanlagen einen seitens der Eisenbahngesellschaft vorgegebenen Grenzwert (Prognosewert) von x cm überschreiten, ist dies auffällig.“

„Wenn die aus den Relativsetzungen und dem Abstand der Messpunkte ableitbaren Neigungsänderungen einen Wert von $1:x$ unterschreiten, ist dies kritisch.“

Auch Anordnungen, das Messprogramm betreffend, fallen in diesen Bereich:

„Wenn Messpunkte, die derzeit einmal täglich zu messen sind, nicht täglich gemessen werden, so ist der Messtechniker darauf hinzuweisen und eine Begründung einzuholen.“

Das öffentliche, projektspezifische Wissen umfasst nun alle von derartigen, in der Regel auch schriftlich vorliegenden, für das jeweilige Projekt verbindlichen Parametern ableitbaren Aussagen. Einige Parameter können zeitlich unveränderlich sein, andere hingegen mitunter häufige Änderungen erfahren (z. B., wenn neue Messintervalle festgelegt werden). Die ableitbaren Aussagen werden jedoch eher gleich bleiben. Die Problematik der Unschärfe spielt hier ebenso eine Rolle, da für die Interpretation der Verschiebungen zwar klare (scharfe) Vorgaben vorliegen können, die Beurteilung der „Auffälligkeit“ einer Abweichung von diesen jedoch unsicher sein kann und daher der Begriff in einem wissensbasierten System wohl besser anhand einer Skalierung oder unscharf modelliert werden sollte. Dennoch reicht dieses Wissen keineswegs aus, um eine vollständige Interpretation vornehmen zu können, da nur einige wenige Aspekte bzw. Komponenten von Verschiebungen durch derartige Vorgaben berührt werden.

- **nicht öffentliches, persönliches Fachwissen**

Das persönliche Fachwissen umfasst nun für alle Bereiche, für die keine expliziten, „externen“ Vorgabewerte existieren, eigene, projektabhängige und situationsbezogene Modellvorstellungen über das zu erwartende Verschiebungsbild. Implizit kann dies auch größenordnungsmäßige Vorstellungen über Normalwerte, Normalbereiche, etc. inklusive deren Toleranzen bedeuten. Praktisch erstrecken sich diese Annahmen nun auf alle dem Experten als relevant erscheinenden Komponenten und Kombinationen von Verschiebungen. Hierfür werden zu Projektbeginn oftmals Erfahrungswerte (Falldaten) aus vergangenen, vergleichbaren Projekten herangezogen, eigene Prognoserechnungen angestellt oder auch nur heuristische Schätzwerte angenommen. Die getroffenen Annahmen unterliegen, bevor die ersten Messdaten vorliegen, einer größeren Schwankungsbreite und sind deshalb noch als mehr oder weniger vage und unsicher zu betrachten. Erst im Verlauf des Projekts kann er auf zunehmend sichere und genauere, an die Fakten angepasste Modellvorstellungen zurückgreifen. Manchmal kann es sich auch ergeben, dass diese überhaupt erst aus den ersten Messdaten aufgebaut werden können, wofür z.B. empirische Methoden existieren, die aus den ersten Messungen den zu erwartenden, zukünftigen Verschiebungsverlauf extrapolieren. Deren Bildung ist somit als dynamischer Prozess zu verstehen, bei dem das Konzept, die Bewertung der Übergänge normal – auffällig – kritisch als fließend (unscharf) zu betrachten, stets erhalten bleibt.

Für eine weitgehend vollständige Beurteilung des Verschiebungsgeschehens ist das persönliche Fachwissen demnach ausschlaggebend. Es ist unsicher, räumlich und zeitlich veränderlich (ebenso der Grad der Unsicherheit), projektspezifisch, subjektiv und verwendet abermals unscharfe Begriffe. Widersprüchliche Meinungen unterschiedlicher Experten zu ein und demselben Sachverhalt können auftreten. Für das Bilden besagter Modellvorstellungen werden wahlweise falldatenbasierte, modellbasierte (auf Berechnungen beruhende) und/oder heuristische (assoziative) Vorgehensweisen gewählt.

Die folgende Aussage soll als ein mögliches Beispiel solch persönlichen Fachwissens dienen:

„Wenn für den Messpunkt x eine (vom Experten) erwartete Erstsetzung (nach 24h) von y cm überschritten wird, so ist dies (in einem gewissen Grad für ihn) auffällig.“

Hierbei kommt genau dann persönliches Fachwissen zum Ausdruck, falls keinerlei öffentliche Quellen existieren, aus denen er diese Aussage ableiten kann. Möglicherweise

gelangt er zu dieser Ansicht, weil er sich an einen vergleichbaren Fall erinnert, bei dem eine Überschreitung dieses Wertes Probleme nach sich zog (falldatenbasiert), er aufgrund eigener Berechnungen eine Vorstellung über das Normalverhalten hat (modellbasiert) oder er z.B. anhand bereits vorliegender Daten dies einfach intuitiv so einschätzt.

Mit der Art des Wissens (Falldaten, Berechnungsmodelle, Heuristiken), welches der Experte zur Ermittlung einer Vorstellung über das Normalverhalten einsetzt, sind gewisse Eigenschaften [74] verbunden. Tabelle 2 gibt eine Übersicht.

Art des Wissens	Lösbarkeit komplexer Probleme	Anwendungsspektrum	Effizienz	Qualität der Erklärung	Objektivierbarkeit
Falldaten	-	-	0	-	+
Modelle	+	0	-	+	0
Heuristiken	0	+	+	0	-

Tabelle 2: Vergleich falldatenbasierter, modellbasierter und heuristischer Ansätze zur Ermittlung einer Vorstellung über das Normalverhalten von Verschiebungen (-: gering, 0: mittel, +: hoch)

Aus obiger Tabelle wird ersichtlich, dass, betrachtet man die Eigenschaften gleichzeitig als Qualitätskriterien, diese von den einzelnen Wissensarten jeweils unterschiedlich gut erfüllt werden können. Keine unter ihnen kann demnach generell als am geeignetsten betrachtet werden.

Kennzeichen eines richtigen Experten ist es vielmehr, dass er über umfassendes Wissen aus all diesen Wissensarten verfügt und es zur Festlegung seiner Vorstellungen über das Normalverhalten flexibel einzusetzen weiß.

Eine andere, in Zusammenhang mit der auf S. 53 unten angeführten Grundannahme stehende Aussage könnte lauten:

„Wenn die Messpunkte innerhalb der Stationierungsbereiche x bis y keine (vom Experten erwarteten) gleichartigen Verschiebungen aufweisen, so ist dies (für ihn) auffällig.“

Grundsätzlich könnte man hier auch die Meinung vertreten, es handle sich bereits um öffentliches, projektunabhängiges Fachwissen, sofern alle relevanten Fakten zur Verfügung stünden, um gleiche äußere Bedingungen innerhalb der Stationierungsbereiche x bis y annehmen zu können. Ist dies jedoch nicht der Fall, was der Praxis näher kommt, ist diese Aussage als persönliche Expertenmeinung aufzufassen.

- **nicht öffentliches, persönliches Metawissen**

Nicht zuletzt verfügt ein Experte über spezifisches Metawissen (Wissen über Kontrollmechanismen, Vorgehensstrategien, Handlungsalternativen,...). Dieses steuert und überwacht den Einsatz seines Fachwissens und versetzt ihn in die Lage, flexibel:

- das Ziel der aktuell anstehenden Analyse festzulegen
(z.B. nur den Auslastungsgrad der Spritzbetonschale, nur die Standsicherheit der Ortsbrust beurteilen,...)

- den zeitlichen und räumlichen Umfang der aktuell anstehenden Analyse einzugrenzen
(z.B. nur die Daten der letzten Woche, nur die Daten eines bestimmten Achsabschnitts hernehmen,...),
- eine der Situation angepasste, sinnvolle Reihenfolge von Analyseschritten zu planen und Prioritäten zu setzen
(z.B. zuerst die aussagekräftigsten, dann die weniger wichtigen Daten analysieren, zuerst die einfacheren, dann die komplexeren Analysen vornehmen,...),
- Arbeitsschritte hinsichtlich bestimmter Kriterien wie Zeitbedarf, Aufwand, Erfolgsaussichten, etc. einzuschätzen und gegebenenfalls abzubrechen oder neu zu ordnen,
- auf widersprüchliche, fehlende oder falsche Fakten zu reagieren,
- nicht unbedingt erwartete Handlungen zu setzen oder Schlussfolgerungen zu ziehen
(intuitives Vorgehen, absichtliches Ignorieren von Fakten, ...).

Die menschlichen Fähigkeiten zur effizienten Steuerung des Schlussfolgerns sind individuell stark unterschiedlich ausgeprägt und grundsätzlich komplex. Aus wissens-basierter Sicht ist die Repräsentation dieses Metawissens gleichermaßen schwierig wie bedeutsam. Die hierfür zur Verfügung stehenden Techniken erreichen derzeit noch kaum ein mit dem Vermögen menschlicher Experten vergleichbares Niveau. Speziell in diesem Bereich werden die Grenzen technischer Machbarkeit aufgezeigt.

4.4 Charakterisierung der Analyseziele

Die zunächst noch allgemein formulierte Zielsetzung, ein wissensbasiertes System zur automatischen Erkennung auffälliger Verschiebungen zu konzipieren, bedarf einer weiteren Differenzierung hinsichtlich welcher geotechnischen aber auch anderen Aspekte Auffälligkeiten auftreten können. Die beschriebenen Wissensarten kommen stets selektiv, unter Berücksichtigung eines übergeordneten Ziels der Analyse, zur Anwendung. Die Auswahl des gerade nötigen Wissens wird vom Metawissen des Experten gesteuert. An dieser Stelle soll auch angemerkt werden, dass sich die geotechnische Fachbetreuung vor Ort natürlich nicht auf das bloße Erkennen irgendwelcher Auffälligkeiten beschränkt, sondern das Leistungsbild darüber hinaus die Suche nach möglichen Ursachen derselben, das Überlegen und Anordnen bzw. Empfehlen entsprechender Maßnahmen, also ganz allgemein die Mitwirkung an Problemlösungen, umfasst. Diese weitergehenden Aufgaben sollen im Rahmen dieser Arbeit jedoch nur sehr eingeschränkt (innerhalb der Erklärungskomponente des Systems) betrachtet werden.

Die Suche nach Auffälligkeiten kann folgende Haupt- und Teilbereiche betreffen:

- **Auffälligkeiten bzgl. der Datenqualität (primäre und sekundäre Ausgangsdaten)**
 - fehlerhafte Eingaben, grobe Messfehler (Ausreisser)
 - fehlende Daten
 - unvollständige Daten
 - nicht mehr aktuelle, nicht zeitgerecht gelieferte Daten (Terminüberwachung)
 - zu ungenaue Daten
 - nicht allfälligen weiteren Detailvorgaben entsprechende Daten (an falscher Stelle errichtete Messpunkte, etc.)

- **Auffälligkeiten bzgl. der Plausibilität von Daten**
 - widersprüchliche, inkonsistente Daten
 - unsinnige, unmögliche Verschiebungsverläufe
 - manipulierte, erfundene Daten

- **Auffälligkeiten bzgl. geotechnischer Aspekte**
 - Standsicherheit von Bauwerksteilen (der Ortsbrust, Auslastungsgrad der Spritzbetonschale, etc.)
 - Wirksamkeit des Stützmitteleinsatzes, der ausgeführten bautechn. Maßnahmen
 - Über- bzw. Unterschreitung verbindlicher Vorgaben (Grenzwerte, Toleranzen)
 - Über- bzw. Unterschreitung des gewählten Übermaßes beim Ausbruch (Herstellung eines zu großen Überprofils, Gefahr eines Unterprofils)

Werden bei der Interpretation Probleme hinsichtlich der Qualität und Plausibilität der Daten sichtbar, so ist eine Beurteilung der geotechnischen Aspekte unter Umständen nur sehr eingeschränkt möglich. Fehlerhafte Schlüsse können die Folge sein. Demnach ist mit obiger Einteilung gleichzeitig eine sinnvolle Reihenfolge von Interpretationsschritten festgelegt. Die Plausibilität von Daten kann streng genommen auch als ein Aspekt der Datenqualität gesehen werden, wird aber aufgrund ihrer besonderen Stellung als eigener Punkt angeführt.

4.5 Charakterisierung der Analyseergebnisse

Der formelle „output“ des Experten ist der geotechnische Bericht. Gewisse Angaben zu Inhalt und Umfang der geotechnischen Dokumentation eines Projekts finden sich in bestimmten Normen (z.B. ÖNORM B2203-1). Routinemäßig werden auf Baustellen folgende Schriftstücke verfasst:

- **geotechnische Tagesberichte**

In ihnen werden die tagesaktuellen Mess- und Analyseergebnisse zusammengefasst. Die den eher kurz gehaltenen Interpretationen zugrundeliegenden grafischen Darstellungen von Messdaten werden in Form einer Anlage beigelegt. Ergänzend werden Zusatzinformationen wie z.B. die aktuellen Vortriebsstände angegeben. Besondere Vorkommnisse werden gemeldet, Empfehlungen abgegeben. Der Inhalt wird zweckmäßig strukturiert (nach Tunnelabschnitten, nach Bauphasen, nach Messquerschnitten,...). Nachfolgend ist ein Beispiel (Abb. 26) ersichtlich. Textteile, die erkannte Auffälligkeiten wiedergeben, wurden mittels punktierter Linie hervorgehoben.

177. GEOTECHNISCHER TAGESBERICHT

für Montag den 27. September 1999

Vortriebsstand am 26.09.1999 - vormittags

Nordröhre:	Kalotte ca.	589,4 m	geschätzte Überlagerung < 30m
	Kal-sole ca.	584,4 m	
	Strosse ca.	462,0 m	Überlagerung ca. 27,7 m
	Sohle ca.	456,0 m	
Südröhre:	Kalotte ca.	292,6 m	Überlagerung ca. 35,9 m
	Kal-sole ca.	286,6 m	
	Strosse ca.	216,1 m	Überlagerung ca. 26,6 m
	Sohle ca.	210,7 m	

Vortrieb Nordröhre

Kalotte:

MQ 585: Erstmessung zeigte max $y = -19$ mm und max $x = 15$ mm (Pkt. 5 nach innen).

MQ 573: Pkt. 5 nicht gemessen. Die anderen Punkte kriechen.

MQ 557: Kriechende Setzung bei max $y = -36$ mm (Pkt. 4) und max $x = 25$ mm (Pkt. 5 nach innen).

Strosse:

MQ 460: MQ gerade von der Strosse mit 2 m überfahren. Zusätzliche Bewegungen Pkt. 4 $y = -15$ mm, $x = 9$ mm nach innen und Pkt. 5 $y = -6$ mm, $x = 9$ mm nach innen.

MQ 450: Messungen der Kalottenfußpunkte fehlen von Donnerstag bis Samstag. Somit ist eine eventuelle stabilisierende Tendenz nicht ersichtlich.

MQ 440: Linker Kalottenfuß bewegt sich immer noch nach innen obwohl MQ schon mit 22 m von der Strosse überfahren wurde. Sonst wenige Deformationen.

Vortrieb Südröhre

Kalotte:

MQ 290: Größere Ersttagsverformungen im rechten Kalottenfuß (Pkt. 5): $y = -27$ mm und $x = 28$ mm nach innen.

MQ 280: Stabilisierende Tendenz bei $\max y = -53$ mm und $\max x = 13$ mm.

MQ 260: Kriechende Setzungen im linken Kalottenfuß feststellbar.

Strosse:

Am Freitag den 24.9.1999 wurden Risse zwischen Kalottensohlgewölbe und linken Kalottenfuß festgestellt (Stat. 217-226, 233-237, 243-248). Eine Niederankerung der Kalottensohle im Fußbereich wurde veranlasst und durchgeführt. Der Strossenvortrieb wurde auch eingestellt.

MQ 239: Neuer MQ mit 3 Punkte – Pkt. 1,4 und 5. Nullmessung am Sonntag 26.9.99.

MQ 233: (wahre Stat. 230,4): Messung zeigt eine Stabilisierung des linken Kalottenfuß.

MQ 226: Neuer MQ mit 3 Punkte – Pkt. 1,4 und 5. Nullmessung am Sonntag 26.9.99.

MQ 220: (wahre Stat. 222,49): Letztmessung zeigt eine Stabilisierung des MQ verglichen mit der vorletzten Messung.

MQ 208: Letztmessung zeigt eine stabilisierende Tendenz.

Empfehlungen:

1. Da die Messungen (speziell im Bereich Strosse Süd) zeigen, dass das Kalottensohlgewölbe nicht richtig funktioniert (d.h. Versinken der Füße, nur Sperre der Horizontalbewegungen), ist der Ausbildungsdetail Kalottenfuß/Kalottensohlgewölbe zu verbessern bzw. neu zu überlegen.
2. Da die Nachankerung im linken Kalottenfußbereich jetzt schon greift, kann der Vortrieb der Strosse Süd wieder aufgenommen werden.

Nächste Messquerschnitte (MQ):

Nordröhre:

Der nächste MQ ist bei ca. TM 594 (letzter Ring vor der Trompete) einzubauen.

Die MQ sind prinzipiell in die Strosse mit zwei Messpunkten MP 6 und MP 7 zu ergänzen.

Südröhre:

Der nächste MQ ist bei TM 300 einzubauen.

Die MQ sind prinzipiell in die Strosse mit zwei Messpunkten MP 6 und MP 7 zu ergänzen.

Anlagen: Messdiagramme

Abb. 26: Beispiel eines geotechnischen Tagesberichts

- **monatliche oder wöchentliche geotechnische Zwischenberichte**

Diese werden vorbereitend für Bau- oder Bauhauptbesprechungen verfasst und in das jeweilige Besprechungsprotokoll aufgenommen. In ihnen wird rückblickend das Verformungsgeschehen im Berichtszeitraum (im letzten Monat, in der vergangenen Woche) beschrieben und interpretiert. Weiters werden Ausblick, Prognose und Empfehlungen formuliert. Ein inhaltlich gekürztes Beispiel zeigt Abb. 27, wobei erkannte Auffälligkeiten wieder hervorgehoben wurden.

28. BAUHAUPTBESPRECHUNG

am Donnerstag, dem 7. Juni 2001

Vortriebsstand am 06.06.2001 - vormittags

Nordröhre:	Kalotte ca.	2.078,0 m	Überlagerung ca. 18 m
	Kal-sohle ca.	2.072,6 m	Überlagerung ca. 18 m
	Strosse ca.	1.996,1 m	Überlagerung ca. 29 m
	Sohle ca.	1.994,1 m	Überlagerung ca. 30 m
Südröhre:	Kalotte ca.	1.767,2 m	Überlagerung ca. 46 m
	Kal-sohle ca.	1.761,8 m	Überlagerung ca. 47 m
	Strosse ca.	1.726,9 m	Überlagerung ca. 51 m
	Sohle ca.	1.725,2 m	Überlagerung ca. 52 m

RÜCKBLICK

NORDRÖHRE

Kalotte

Im gesamten Berichtszeitraum wurde in der Kalotte bei Abschlagslängen von 1,0 m mit zwei Lagen AQ 60, 30 cm Spritzbeton (ab ca. Station 2030 35 cm) und IBO Ankern ausgebaut.

Im Bereich zwischen Station 1916 und 1945 waren aufgrund der mürben druckhaften Chloritphyllite große und andauernde Vertikalverschiebungen zu beobachten, die erst nach Einbau der Strossensohle beruhigt werden konnten. Im MQ 1926 und MQ 1935 wurden größere Verschiebungen als das angeordnete Übermaß erreicht. In diesen Bereichen ist örtlich ein zumindest theoretisches Unterprofil festzustellen.

In den Firstbereichen wurden bis zu 20 cm (MQ 1935) und in den Fußbereichen bis zu 28 cm (MQ 1926) bis zur Beruhigung der Verformungen nach Strossendurchgang festgestellt. Derartig große Verschiebungen sind bisher im Tunnelbereich nicht beobachtet worden. In diesen Abschnitten war beim Strossenvortrieb ein deutlicher Grundbruch des Gebirges mit einem Abscheren der Kalottensohle zu beobachten.

Die Verschiebungen an der Oberfläche sind mit ca. 7 cm (MQ 1960) bei einer Überlagerung von ca. 35 m ebenfalls groß. In diesem Querschnitt waren bereits Vertikalverschiebungen bemerkbar als der Vortrieb noch ca. 35 m (beim MQ 1926) ent-

fernt war. In den weiter voran liegenden Oberflächenquerschnitten waren die Oberflächenverformungen trotz geringer werdender Überlagerung geringer.

Die vorderen Bereiche zeigen bis zum aktuellen Ortsbrustbereich deutlich geringere Vertikal- und Horizontalverschiebungen.

Im Bereich mit verstärktem Auftreten von Rauhdecken sind nur geringe Vertikalverformungen messbar. Allerdings wurden immer wieder rinnende Wasserzutritte beobachtet, die zu lokalen Instabilitäten führen können.

...

AUSBLICK, PROGNOSE UND EMPFEHLUNGEN

NORDRÖHRE

Kalotte

Die Überlagerung nimmt weiterhin ab und liegt derzeit bei ca. 18 m. In weiterer Folge wird auch die Distanz der Röhren zueinander kontinuierlich weniger. Es sind noch ca. 50 m bis zum Erreichen des Deckels aufzufahren. Derzeit wird mit Abschlagslängen von 1,0 m mittels Bagger in Teilflächen vorgetrieben. Es werden weiterhin rasche Wechsel zwischen Phyllit und Rauhdecken erwartet. Die Rauhdecken sind derzeit leicht mit dem Bagger zu lösen und haben nicht die Festigkeit wie einzelne Bereiche im Voreinschnitt Ost. Es werden auch weiterhin kleinere Wasserzutritte erwartet, die zu lokalen Instabilitäten führen können.

Die Oberflächensetzungen und die Verformungen im Tunnel sind derzeit relativ gering. Eine Zunahme der Verformungen ist bei einer eventuellen Abnahme des Rauhdeckenanteils zu erwarten.

...

Abb. 27: Ausschnitt aus dem Protokoll einer Bauhauptbesprechung

- **außerplanmäßige, geotechnische Berichte**

Diese Sonderberichte werden vorwiegend im Fall besonders hervorzuhebender oder unverzüglich zu berichtender Vorkommnisse erstellt. In unten angeführter Abb. 28 ist ein solcher Fall angeführt.

34. MEMO 16.03.2000

Betreff: Endbericht Messungen des ÖBB Mastes bei ca. TM 130

Wie die Messungen zeigen, sind die Verformungen im Bereich des Mastes abgeklungen.

Die größte Setzung des Mastes beträgt ca. –35 mm. Die größte Differenzsetzung des Mastes beträgt ca. – 20 mm. Die daraus berechenbare größte Neigung des Mastes beträgt –0,47%. Die prognostizierten und geforderten Grenzwerte von –57 mm maximaler Setzung und 0,67% maximaler Neigung wurden eingehalten. Es wurden ca. 60% der maximal zulässigen Setzungen und ca. 70% der zulässigen Neigung beobachtet. Die geringen Hebungen ab ca. November 1999 werden auf den Einfluss des Frostes zurückgeführt. Wie die Messungen des Hanges zeigen, kann von stabilen Verhältnissen des gesamten Hanges ausgegangen werden.

Abb. 28: Beispiel eines geotechnischen Memos

- **geotechnischer Schlussbericht**

Nach Beendigung des Projekts wird ein umfassender Schlussbericht verfasst. Er behandelt für alle Aktivitätsbereiche die wesentlichen Ereignisse aus geotechnischer Sicht in chronologischer Form und beinhaltet zahlreiche Diagramme in der Anlage. Die Gliederung des Dokument kann z.B. anhand der Berichtszeiträume der Bauhauptbesprechungen erfolgen. Abb. 29 zeigt einen kleinen Textausschnitt aus einem solchen Dokument.

...

Vortrieb Ost

Zeitraum von 9.4.1997 bis 14.5.1997 (4)

Erst wenige Meter bergmännischer Vortrieb nach der Deckelstrecke. Die ersten beiden Messquerschnitte zeigen bei geringer Überlagerung eine Setzung von ca. 15mm und nahezu keine Horizontalverformung.

Zeitraum von 14.5.1997 bis 18.6.1997 (5)

Die Überlagerung beträgt derzeit 10-15m. Noch ganz langsames Absinken der Kalotte bei sehr geringer, schnell abklingender Querverformung feststellbar. Nach Ringschluss langsames Abklingen des Setzungstrends sichtbar.

Zeitraum von 18.6.1997 bis 30.7.1997 (6)

Sehr geringe Verformungen sowohl vertikal als auch horizontal. Firstsetzung von Station 116 bis zur Ortsbrust zwischen 8 und 10mm. Horizontalverformungen der Kalottenfüße kleiner 5mm.

...

Abb. 29: Textausschnitt aus einem geotechnischen Abschlussbericht

Neben den beschriebenen offiziellen Dokumenten zählt natürlich auch eine Vielzahl weiterer teilweise nur mündlich ergangener Stellungnahmen in Diskussionen und Besprechungen grundsätzlich zum „output“ des Experten.

4.6 Zusammenfassende Bewertung des Analysewissens

Das Wissen über die Interpretation von Verschiebungsdaten wird in die Kategorien

- öffentliches, projektunabhängiges Fachwissen (1),
- öffentliches, projektspezifisches Fachwissen (2),
- nicht öffentliches, persönliches Fachwissen (3) und
- nicht öffentliches, persönliches Metawissen (4)

unterteilt. Wissensart (1) wird als allgemein gültig und im Fachbereich anerkannt, jedoch hinsichtlich einer konkreten Problemlösung als nicht ausreichend und ungenau charakterisiert. Es kann aus entsprechenden Publikationen des Fachbereichs akquiriert werden. Wissensart (2) wird als projektabhängig sowie zeitlich und räumlich veränderlich beschrieben. Es gilt als verbindlich, bezieht sich aber nur auf einige wenige Interpretationsaspekte. Es liegt explizit, in der Regel auch in schriftlicher, nachlesbarer Form vor. Wissensart (3) wird als besonders wesentlich und umfangreich eingeschätzt, zudem als subjektiv, unsicher und unscharf. Es kann nur durch entsprechende Erhebungstechniken zugänglich gemacht werden. Wissensart (4) bildet die Steuerungs- und Kontrollkomponente der anderen Wissensarten.

Die in den vorangehenden Kapiteln angeführten Beispiele für die einzelnen Wissensarten sind eindeutig regelorientiert, eine regelbasierte Wissensrepräsentation scheint daher geeignet.

Im Hinblick auf das Erkennen von Auffälligkeiten in den Verschiebungsdaten werden Haupt- und Teilbereiche der Interpretation unterschieden, für welche jeweils spezifisches Wissen aus den oben genannten Kategorien erforderlich ist. Die Hauptbereiche umfassen

- Aspekte der Datenqualität,
- Aspekte der Plausibilität der Verschiebungen und
- geotechnische Aspekte.

In dieser Abfolge bilden sie auch eine sinnvolle Reihenfolge der Interpretationsschritte.

Die Interpretationsergebnisse werden in verschiedenen geotechnischen Berichtsdokumenten festgehalten. Im Wesentlichen sind dies

- Tagesberichte,
- monatliche oder wöchentliche Zwischenberichte,
- außerplanmäßige Berichte und
- Schlussberichte.

In ihnen wird über die geotechnische Situation informiert, die erkannten Auffälligkeiten werden angeführt. Warum diese als solche eingestuft werden, wird je nach Berichtsart mehr oder weniger ausführlich anhand der in Kapitel 4.1.2 beschriebenen Sekundärdaten begründet:

Die Verschiebungen an der Oberfläche sind mit ca. 7 cm (MQ 1960) bei einer Überlagerung von ca. 35 m ebenfalls groß.

Aus den im Rahmen dieser Arbeit gesichteten Berichten wird zudem deutlich, dass für viele Auffälligkeiten die Angabe möglicher Ursachen oder Erklärungen fehlt und es zumeist bei einer numerischen Beschreibung und qualitativen Einschätzung (groß, gering,...) bleibt.

5. Entwicklung eines Software-Prototyps

Im nun folgenden Kapitel werden Konzepte und Beispiele zur Repräsentation und Anwendung des im vorangehenden Abschnitt beschriebenen Fakten- und Analysewissens erläutert, diskutiert und ihre Implementationen in einem für diese Arbeit erstellten Software-Prototyp beschrieben.

In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass der Wissensrepräsentationsformalismus im Grunde vor der zu wählenden Software-Entwicklungsumgebung entschieden werden sollte und nicht – wie bei dieser Arbeit - umgekehrt. Es wären demnach am Markt erhältliche Produkte zu evaluieren, um aus ihnen jenes auszuwählen, welches den gewünschten Formalismus für Problemrepräsentation und -lösung bestmöglich unterstützt. Hierbei spielen natürlich neben technischen Kriterien vor allem auch wirtschaftliche Faktoren wie Anschaffungskosten, Kosten für Support, Einschulung, Updates, etc. eine erhebliche Rolle. Für die vorliegende Arbeit war die Ausgangssituation insofern eine andere, als die Anschaffung einer kostenpflichtigen Entwickler-lizenz nicht beabsichtigt war und nur wenige Programme für wissenschaftliche Zwecke auch kostenlos verwendet werden können. Mit **CLIPS** war ein solches Programm verfügbar und es kann nicht ausgeschlossen werden, dass ein anderes (vor allem ein kostenpflichtiges) hinsichtlich der Möglichkeiten zur Wissensrepräsentation besser geeignet gewesen wäre. Ein aufwändiger Vergleich verschiedener Produkte wurde allerdings nicht angestrengt. Aufgrund der im folgenden angegebenen Merkmale wurde CLIPS aber für den Zweck der Erstellung eines Prototyps als zweckmäßig erachtet.

5.1 Die Expertensystem – Entwicklungsumgebung CLIPS

5.1.1 Merkmale, Komponenten und Module von CLIPS

CLIPS (C Language Integrated Production System) stellt eine Expertensystem-Entwicklungsumgebung dar, welche von der Artificial Intelligence Section (heute Software Technology Branch) des Johnson Space Center der NASA ursprünglich entwickelt und erstmals 1986 in der Version CLIPS 3.0 für eine kommerzielle Nutzung freigegeben wurde. CLIPS ist, wie der Name andeutet, vollständig in der konventionellen Programmiersprache C erstellt. Neben der damit verbundenen C-Kompatibilität ist von besonderem Vorteil, dass es sowohl

- als Stand-alone-Programm genutzt werden kann,
- von einigen Programmiersprachen (C, Fortran) aufgerufen werden kann als auch
- seinerseits mittels externer Funktionsaufrufe fremde Programme aufrufen kann.

Die verwendete Version CLIPS 6.0 unterstützt vier Arten der Wissensrepräsentation:

- **Fakten**, zur Repräsentation elementarer Wissensbausteine,
- **Regeln**, vorzugsweise zur Repräsentation heuristischen, auf Erfahrung basierenden Wissens,
- **Funktionen und generische Funktionen**, zur Darstellung prozeduralen Wissens und

- **Objekt-orientiertes Programmieren**, in erster Linie ebenso für prozedurales Wissen, mit den bekannten Konzepten Klasse, Vererbung, Kapselung, Polymorphismus, etc.
-

Der in CLIPS integrierte Inferenzmechanismus basiert auf einem Netzwerk-Algorithmus (*RETE-algorithm*), der kontrolliert, welche Regeln exekutiert werden und in welcher Reihenfolge. Es erfolgt eine datengetriebene Vorwärtsverkettung, bei der Fakten und gegebenenfalls vorhandene Objekte den Inferenzprozess stimulieren (siehe Kapitel 3.6, S. 29). Diese Verkettungsstrategie wird für die vorliegende Problemstellung gegenüber einer Rückwärtsverkettung eindeutig als vorteilhafter erachtet, da von einer großen Menge an Fakten, einer vergleichsweise eher geringen Menge an Regeln, vollständig zu vermeidenden Benutzerinterventionen während des Inferenzablaufs und vielen, wenn auch schlecht spezifizierten Lösungen auszugehen ist. Eine in den Arbeitsspeicher (*working memory*) geladene Regel wird exekutiert, sofern ihre Vorbedingung(en), bestehend aus einer Verknüpfung dieser Fakten und/oder Objekte (= *fact pattern*) erfüllt ist, das heißt, sofern diese Fakten und/oder Objekte ebenfalls im Arbeitsspeicher vorhanden sind (in englischer Formulierung: *rules may pattern match on facts and objects*). Ein unter CLIPS entwickeltes Programm besteht daher im Wesentlichen aus Regeln, Fakten und Objekten (siehe Kap. 5.1.2).

Zusätzlich verwendet wurde **wxCLIPS** (Version 1.64), eine CLIPS – Erweiterung, in welcher CLIPS 6.0 - je nach Kompilierung - vollständig eingebettet werden kann und welche unter anderem eine umfangreiche Programmbibliothek für die Erstellung einer grafischen Benutzeroberfläche unter MS WINDOWS bietet. Mittels wxCLIPS können somit die bekannten Elemente zur Gestaltung einer ansprechenden Programmoberfläche wie Menus, Fenster, Icons, Schalter, etc. für das eigentliche Anwendungsprogramm programmiert werden. wxCLIPS stellt auch Klassen für den Zugriff auf Microsoft's ODBC – Produkt bereit, wodurch Datenbankoperationen ermöglicht werden.

Ein weiteres Zusatzmodul stellt **FuzzyCLIPS** dar, mit dessen Hilfe Fuzzy-Fakten und Fuzzy-Regeln gebildet werden können. Die Möglichkeiten dieses Programmmoduls (in unten stehender Abb. 30 im Programmtitel ersichtlich) wurden jedoch nur teilweise ausgenutzt, da hauptsächlich mit festen Regeln gearbeitet wurde. Für detailliertere Informationen zu diesen Programmen sei auf entsprechende Literatur verwiesen [54, 77].

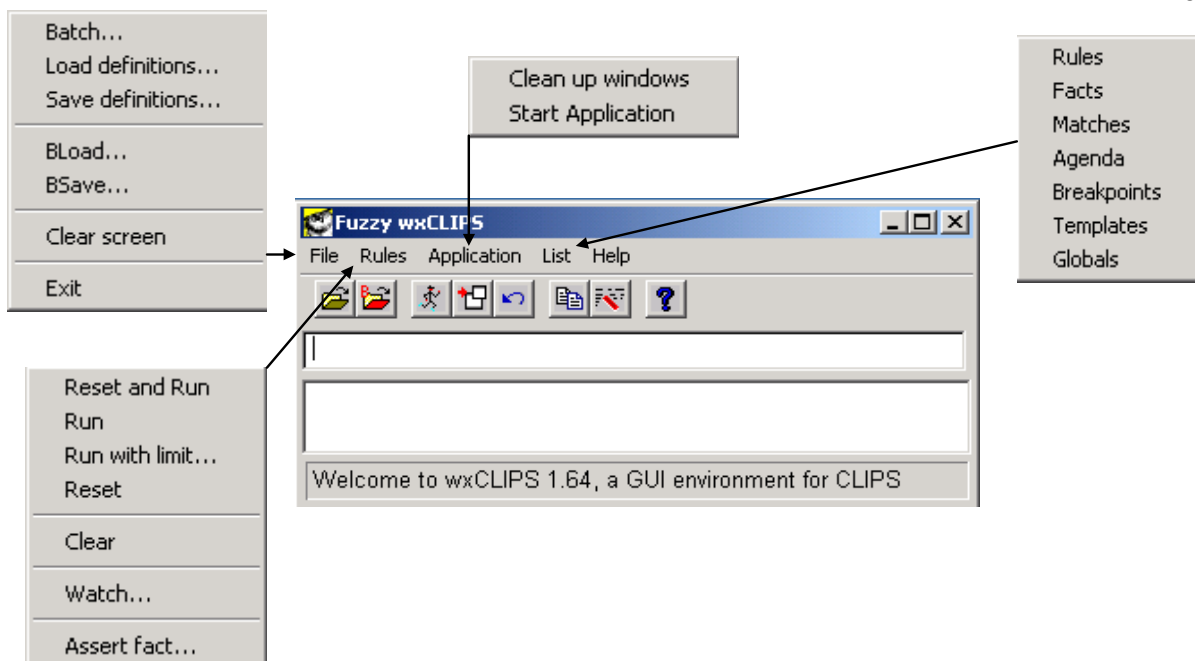


Abb. 30: Benutzeroberfläche und Menus der Expertensystem-Entwicklungsumgebung Fuzzy wxCLIPS

Da im weiteren Verlauf dieses Kapitels immer wieder CLIPS-spezifische Begriffe verwendet bzw. Syntaxbeschreibungen von Regeln und Fakten angeführt werden, soll nachfolgend zur Erleichterung des Verständnisses in die wesentlichsten programmiertechnischen Grundlagen dieser Entwicklungsumgebung eingeführt werden.

5.1.2 Wissensrepräsentationen in CLIPS

Für die erwähnten Möglichkeiten der Wissensrepräsentation in CLIPS werden, soweit sie im Prototyp Verwendung finden, in der Folge generische Syntaxbeschreibungen und einfache Beispiele angegeben. In der Terminologie von CLIPS werden die Repräsentationsformalismen auf Syntaxebene als Konstrukte (*constructs*) bezeichnet.

1) Fakten

In CLIPS können zur Repräsentation von Informationen acht primitive Datentypen verwendet werden (float, integer, symbol, string, external-address, fact-address, instance-name und instance-address). Ein Fakt besteht nun aus einer Liste ein oder mehrerer atomarer Werte dieser Datentypen. Zwei Formate zur Darstellung von Fakten sind möglich:

Ordered Facts bestehen aus einem Symbol gefolgt von einer Sequenz aus weiteren Werten. Anhand des Symbols wird der Fakt bezeichnet und referenziert. Mögliche Beispiele sind:

(father-of jack bill) “Bill ist der Vater von Jack”

(measured_deformations 3 1 „ 6.3.2002, 10:01:25“ -7.3 2.5 10.2)

„Messpunkt 1 in Messquerschnitt 3 zeigt am 6.3.2002 um 10:01:25 eine Setzung von -7,3 mm, eine Horizontalverschiebung von 2,5 mm und eine Längsverschiebung von 10,2 mm.“

Bei der Verwendung dieses Faktenformats sind Bedeutung, Anzahl und Reihenfolge der Werte eigentlich nur ihrem Schöpfer bekannt. (Es könnte ja auch Messpunkt 3 des Messquerschnitts 1

gemeint sein). O.a. Beispiele werden als *ordered facts* bezeichnet, da eben die Reihenfolge der Werte für die korrekte Interpretation entscheidend ist.

Non-ordered Facts codieren demgegenüber Informationen positional, d.h., man muss nur wissen, welche Informationen grundsätzlich dargestellt werden, nicht aber, an welcher Stelle. Dieses Faktenformat ist in CLIPS mittels des Konstrukts DEFTEMPLATE realisierbar. Die allgemeine Syntaxstruktur dieses Konstrukts zeigt Abb. 31.

```
(deftemplate <deftemplate-name> [<comment>]
  <slot-definition>*)
<slot-definition> ::= <single-slot-definition> |
  <multislot-definition>
<single-slot-definition> ::= (slot <slot-name>
  <template-attribute>*)
<multislot-definition> ::= (multislot <slot-name>
  <template-attribute>*)
<template-attribute> ::= <default-attribute> |
  <constraint-attribute>
<default-attribute> ::= (default ?DERIVE | ?NONE | <expression>*) |
  (default-dynamic <expression>*)
```

Abb. 31: Syntaxstruktur des DEFTEMPLATE – Konstrukts in CLIPS

Das Konstrukt ist ähnlich der in prozeduralen Programmiersprachen (C, Pascal) verwendeten Definitionen *structure* bzw. *record*. Jeder DEFTEMPLATE-Fakt hat einen Namen (<deftemplate-name>), über welchen er referenziert wird. Die einzelnen Informationen, die durch diesen Fakt beschrieben werden, sind in separaten *slots* abgelegt. Jeder dieser *slots* wird wiederum mit einem eindeutigen symbolischen Namen (<slot-name>) bezeichnet. Ein *slot* kann genau einen (<single-slot-definition>) oder einen oder mehrere (<multi-slot-definition>) Werte der erlaubten primitiven Datentypen enthalten. Für diese Werte können explizit Eigenschaften und Einschränkungen (<template-attribute>) deklariert werden. Dabei kann es sich um Festlegungen des Datentyps (*type-attribute*), des Wertebereichs (*range-attribute*) oder der Werteanzahl eines multislots (*cardinality-attribute*) handeln. Der *ordered fact* des vorigen Beispiels ist als *non-ordered fact* generisch wie folgt deklarierbar (Abb. 32):

```
(deftemplate deformation
  (slot section (type INTEGER)
  (range 1 ?VARIABLE))
  (slot point_ID (type INTEGER)
  (range 1 20))
  (slot epoch (type STRING))
  (multislot values (type FLOAT)
  (cardinality 3 3)) ; der multislot muss exakt drei Werte enthalten
)
```

Abb. 32: Generische Beschreibung eines non-ordered fact mittels des Konstrukts DEFTEMPLATE

Im Zuge der Instanzierung werden den *slots* konkrete Werte zugewiesen. Für das erwähnte Beispiel stellt sich der instanziierte Fakt hernach folgendermaßen dar:

(deformation (section 3) (point_ID 1) (epoch „ 6.3.2002, 10:01:25“) (values – 7.3 2.5 10.2))

Die Reihenfolge, in der die *slots* angeführt werden, ist nun nicht mehr von Bedeutung. In dieser Form kann der Fakt ins *working memory* des Systems geladen werden.

Eine gewisse Besonderheit gegenüber konventionellen Programmiersprachen ist, dass nicht unbedingt allen *slots* bzw. *multislots* bei der Instanzierung explizit Werte zugewiesen werden müssen. Es können je nach Deklaration oder Fehlen des *<default-attribute>* (wie in Kap. 5.3 gezeigt wird) auch vom System automatisch Werte eingesetzt werden.

Im konzipierten Prototyp werden je nach Komplexität der durch sie dargestellten Wisseninhalte sowohl *ordered facts* als auch *non-ordered facts* verwendet. Sie bilden jene fundamentalen Wissensseinheiten, auf die mittels Regeln zugegriffen wird.

2) Regeln

Eine CLIPS-Regel wird definiert durch Deklarationen, Bedingungen und Aktionen, die bei Eintreten der Bedingungen ausgeführt werden. Sie besteht daher aus drei Teilen. Im ersten Teil (*<declaration>*) sind Regeleigenschaften optional festlegbar. Im zweiten Teil (*<conditional-element>*) sind die Regelbedingungen zu deklarieren. Erster und zweiter Teil gemeinsam werden als *LHS (left hand side)* oder *antecedent* bezeichnet. Der dritte Teil (*<action>*), auch als *RHS (right hand side)* oder *consequent* bezeichnet, listet die Regelaktionen auf. Abb. 33 zeigt die allgemeine Syntaxstruktur einer CLIPS-Regel (Konstrukt *DEFRULE*).

```
(defrule <rule-name> [<comment>]
  [<declaration>]
  <conditional-element>*
=>
  <action>*
)
```

Abb. 33: Syntaxstruktur des *DEFRULE* – Konstrukts in CLIPS

Die wesentlichste Regeleigenschaft ist die Prioritätszahl (*salience*), mit der die Reihenfolge des Feuerns von Regeln explizit gesteuert werden kann. Regeln höherer Priorität werden vor Regeln niedrigerer Priorität ausgeführt. Bei gleichrangigen Regeln wird dies anhand der gewählten *conflict resolution strategy* vom System entschieden (Details hierzu in [54] bzw. [77]).

Der Abschnitt der Regelbedingungen besteht aus einer Liste ein oder mehrerer Fakten der oben beschriebenen Faktenformate *ordered facts* oder *non-ordered facts*. Fakten können darin mittels logischer Operatoren konjunktiv (AND) oder disjunktiv (OR) verknüpft werden. Implizit geht CLIPS von der konjunktiven Verknüpfung der gelisteten Fakten aus. Ebenso kann das Nichtvorhanden-Sein von Fakten (NOT) als Bedingung auftreten. Für bestimmte Verschachtelungen logischer Verknüpfungen existieren zusätzliche Operatoren (FORALL, EXIST). In den Regelbedingungen können zudem einzelne Werte in den Fakten lokalen Variablen zugewiesen und an diese weitere Bedingungen geknüpft werden. Erst dadurch wird eine flexible Formulierung allgemeiner und komplexer Bedingungen ermöglicht.

Die Liste der Regelaktionen wird sequentiell abgearbeitet. Aktionen können unterschiedliche Aufgaben erfüllen bzw. Prozesse auslösen (I/O-Steuerungen, Berechnungen, ...). Für das

```
(defrule check_longitudinal_deformation
  (declare (salience 5))
  (deformation (section ?sec) (point_ID ?ID) (epoch ?ep) (values ? ? ?v3&: (> ?v3 10)))
  (not (outlier ?sec ?ID ?ep))
=>
  (format t "Die Längsverformung des Punktes %g in Messquerschnitt %g
    ist am %s größer als 10 mm." ?ID ?sec ?ep)
  (assert (big_long_def ?sec ?ID ?ep ?v3)))
```

working memory entscheidende Aktionen sind die Generierung neuer und das Löschen oder Ändern bestehender Fakten. Diese Aktionen werden mit den CLIPS-Befehlen *assert*, *retract* und *modify* ausgelöst und führen zu einem dynamischen update des *working memory*s. Abb. 34 zeigt ein Syntaxbeispiel einer einfachen CLIPS-Regel.

Abb. 34: Beispiel einer einfachen CLIPS-Regel

Erläuterung: Die Prioritätszahl (*salience*) der Regel **check_longitudinal_deformation** ist 5. Die Regel hat zwei Bedingungen. Die erste ist das Vorliegen eines DEFTEMPLATE-Fakts *deformation*, für den gilt, dass der dritte Wert des multislots *values* (die Längsverschiebung gemäß vorigem Beispiel) größer als 10 mm sein muss. Die zweite ist das Nicht-Vorliegen eines ordered fact *outlier*. Die interessierenden Werte der beiden Fakten werden Variablen (?sec, ?ID, ?ep und ?v3) zugewiesen. Die Werte müssen für beide Fakten ident sein. Die Regel führt zwei Aktionen aus. Die erste besteht aus einer Textausgabe am Bildschirm, in der die den Variablen zugewiesenen Werte angegeben werden. Die zweite fügt einen ordered fact *big_long_def* dem *working memory* hinzu.

Die Abarbeitung von Regeln (Recognize-Act-Cycle)

In ihrer Gesamtheit bildet die Liste der Regelbedingungen ein Faktenmuster (*fact pattern*). Werden mehrere Regeln geladen, so werden deren Regelbedingungen einzeln gegen das *working memory gematcht*. Für jedes *gematchte* Faktenmuster wird die Regel samt zugehöriger Fakten zunächst in einer *agenda* zwischengespeichert, jedoch noch nicht exekutiert. Die *agenda* stellt hierbei einen eigenen Speicherbereich in der Art eines *stacks* dar. Unter Berücksichtigung der Prioritätszahlen bzw. der gewählten *conflict resolution strategy* wird die *agenda* sortiert. Das Exekutieren der Regelaktionen erfolgt erst nach explizitem Aufruf des CLIPS-Befehls *run*. Führt irgendeine Regelaktion daraufhin zu einem update des *working memory*s, wiederholt sich dieser *Recognize-Act-Cycle* genannte Vorgang. Er terminiert, wenn die *agenda* leer ist. Im Gegensatz zu IF - THEN statements bei prozeduraler Programmierung, die nur dann ausgeführt werden, wenn die entsprechende Stelle im Programmcode erreicht wird, wird mit dem Laden von Regeln ein WHENEVER – THEN Vorgang ausgelöst.

Auf die im Prototyp verwendeten Arten von Regeln wird in Kapitel 5.2 näher eingegangen.

3) Funktionen und generische Funktionen

Für das Ausführen elementarer Funktionen wie z.B. mathematischer Operationen (+, -, *, /, ...) oder I/O-Steuerungen existieren CLIPS-interne Befehle. Externe in anderen (prozeduralen) Sprachen entwickelte Funktionen können aufgerufen werden. Benutzerdefinierte Funktionen können mittels des Konstrukts DEFFUNCTION erstellt werden. Abb. 35 zeigt die generische Syntax des Konstrukts.

```
(deffunction <name> [<comment>]
  (<regular-parameter>* [<wildcard-parameter>])
  <action>*)

<regular-parameter> ::= <single-field-variable>
<wildcard-parameter> ::= <multifield-variable>
```

Abb. 35: Syntaxstruktur des DEFFUNCTION – Konstrukts in CLIPS

Eine DEFFUNCTION ist mit einem eindeutigen, von allen anderen Systemfunktionen verschiedenen Namen (*<name>*) zu bezeichnen. Die an sie zu übergebenden Parameter (*<regular-parameter>* und / oder *<wildcard-parameter>*) sind zu deklarieren. Die Aktionen (*<action>*) der Funktion werden sequentiell ausgeführt. Das Resultat der letzten Aktion ist das Endergebnis der Funktion und wird rückübergeben. Hat eine Funktion kein definiertes Endergebnis, wird die Zahl 0 rückübergeben. Ein einfaches Beispiel zeigt Abb. 36.

```
(deffunction velocity
  (?dezdate2 ?def2 ?dezdate1 ?def1)
  ((/- ?def2 ?def1) ? (- ?dezdate2 ?dezdate1))
)
```

Abb. 36: Beispiel einer einfachen CLIPS-Funktion

Erläuterung: Die Funktion **velocity** errechnet aus zwei Messzeitpunkten *?dezdate1* und *?dezdate2* und den dazugehörigen Verformungen *?def1* und *?def2* die Verformungsgeschwindigkeit.

Aktionen benutzerdefinierter Funktionen können ihrerseits Funktionsaufrufe sein (auch rekursive) oder auch Veränderungen des working memorys bewirken (*assert*-Befehl). Sie können sowohl innerhalb von Regeln (in der LHS und RHS) als auch im Code des Hauptprogramms verwendet werden.

Im entwickelten Prototyp werden DEFFUNCTION-Deklarationen für verschiedene Vorverarbeitungsprozesse verwendet, die nach stereotypen mathematischen Algorithmen ablaufen. Vereinzelt werden sie innerhalb der LHS bestimmter Regeln in der Form boolescher Funktionen auch zur Repräsentation von Entscheidungswissen eingesetzt. In der RHS von Regeln dienen sie vorwiegend der Steuerung von Ausgaben. Mittels der CLIPS-Konstrukte DEFGENERIC und DEFMETHOD können auch generische Funktionen erstellt werden, deren Ergebnis vom Typ der ihnen übergebenen Argumente abhängig gemacht werden kann. Im Prototyp werden diese Konstrukte jedoch nicht genutzt.

4) Objekte

Mit dem Konstrukt DEFCLASS ermöglicht CLIPS die generische Beschreibung von Klassen von Objekten im Sinne objektorientierten Programmierens. Instanzen von Klassen können Fakten des working memorys und Bedingungen von Regeln bilden.

Im Prototyp wird zur Repräsentation von Fakten, obwohl für eine sinnvolle Verwendung objektorientierter Methodiken grundsätzlich Möglichkeiten gesehen werden, diese Option nicht genutzt. Die Repräsentation von Fakten in den eingangs beschriebenen Formaten (*ordered facts*, *non-ordered facts*) war für die vorliegende Arbeit ausreichend.

Objektorientiertes Programmieren ist in beschränktem Umfang lediglich für die Erstellung des eigentlichen Anwendungsprogramms nötig, da das Modul wxCLIPS die Elemente der Benutzeroberfläche (Fenster, Icons, Schalter, etc.) als Klassen zur Verfügung stellt.

5.1.3 Weitere Konstrukte und Befehle der CLIPS-Umgebung

Die wesentlichsten weiteren, der Erstellung eines Anwendungsprogramms unter CLIPS dienlichen und im Prototyp genutzten Konstrukte sowie Befehle, sind noch zu erläutern.

1) Variablen

Für Deklaration und Initialisierung globaler Variablen ist das Konstrukt DEFGLOBAL vorgesehen. Globale Variablen sind darin in der Form *?*<symbol>** (z.B. *?*a**, *?*var_1**) zu bezeichnen. In CLIPS sind keine expliziten Datentypdeklarationen vorgesehen. Eine globale Variable übernimmt und behält automatisch den Datentyp des ihr im Konstrukt DEFGLOBAL erstmals zugewiesenen Wertes (z.B. *?*a* = 3.234*, *?*var_1* = hoch*).

Lokale Variablen sind im Prototyp vorwiegend in Funktionen und Regeln zu finden. Sie sind in der Form *?<symbol>* (z.B. *?def1*, *?dezdate2*, siehe Abb. 36) zu benennen. Im Zuge von Aktionen, also innerhalb von Funktionen oder der RHS von Regeln können Variablen über den Befehl **bind** (z.B. *(bind ?def1 3.5)*, *(bind ?*var_1* hoch)*) Werte zugewiesen werden. Innerhalb der LHS von Regeln können die Werte von *ordered facts* oder slot-Werte von *non-ordered facts* auf lokale (jedoch nicht auf globale) Variablen abgebildet werden (z.B. *...(section ?sec)....*, siehe Abb.34).

2) Module

Das Konstrukt DEFMODULE erlaubt eine Partitionierung des Aufbaus und Ablaufs der Wissensbasis. Die bisher genannten Konstrukte können zu diesem Zweck unterschiedlichen Modulen zugeordnet werden. Nur die innerhalb eines Moduls befindlichen Konstrukte können uneingeschränkt aufeinander zugreifen. Es können damit beispielsweise Fakten für Regeln unsichtbar gemacht werden. Um die Regel aus Abb. 34 einem Modul mit dem Namen *MAIN* zuzuordnen, ist ihre Syntax wie folgt zu erweitern:

(defrule MAIN:: check_longitudinal_deformation ...)

Mit dem Befehl **set-current-module** *<module-name>* wird ein Modul zum augenblicklich aktiven Modul der Wissensbasis erklärt.

3) Befehle

Der Befehl **clear** entfernt alle Konstrukte und assoziierte Datenstrukturen (Fakten, Objekte) aus der CLIPS-Umgebung. Der Befehl **reset** löscht die *agenda* und alle Fakten und Objekte. Konstruktdeklarationen werden reinitialisiert, globale Variablen auf ihre initialen Werte zurückgesetzt. Mit dem Befehl **system** *<lexeme-expression>** können Befehle des Betriebssystems aufgerufen werden.

5.1.4 Aufbau und Ablauf eines CLIPS - Hauptprogramms

Der Programmcode eines CLIPS-Hauptprogramms besteht zunächst aus dem *header*, in welchem die Konstrukte DEFMODULE, DEFGLOBAL, DEFTEMPLATE und DEFFUNCTION zu deklarieren sind bzw. aus Befehlen zum Laden der Deklarationen aus externen Dateien (**load** *<filename>*). Anschließend ist eine im System namensspezifische DEFFUNCTION (**app-on-init**) zu deklarieren, die den gesamten Programmablauf steuert. Der Aufbau der Benutzer-

oberfläche, das Ausführen der definierten Funktionen und speziell das Laden von Regeln und Fakten ins working memory (wiederum aus externen Dateien) sowie das Anstoßen des Inferenzprozesses (CLIPS-Befehl: **run**) sind in dieser Funktion festzulegen. Das Hauptprogramm läuft also rein prozedural ab. Es können alle wesentlichen in der konventionellen Programmierung geläufigen Standardfunktionen wie Schleifen (CLIPS-Befehle: **while - do**, **loop-for-count - do**), Bedingungen (**if - then**) oder I/O-Anweisungen (**format**, **print**, **read**) verwendet werden.

5.2 Beschreibung des Software-Prototyps

5.2.1 Verwendungsparadigma

In den Kapiteln 5.3 und 5.4 werden für ausgewählte Beispiele der in Kapitel 4.1 beschriebenen Ausgangsdaten adäquate Faktenrepräsentationen vorgestellt. Diese sind im Prototyp implementiert. In Kapitel 5.5 werden für spezielle Problemfälle aus dem Bereich des Analysewissens (Kapitel 4.3) bestimmte Repräsentationen und Lösungen erarbeitet. Diese sind ebenso implementiert. Es wurde daher weder angedacht, ein System zu entwickeln, welches das umfassende Faktenwissen des Anwendungsgebietes möglichst vollständig repräsentiert, noch eines, welches möglichst viele darin befindliche Probleme zu lösen versucht. Es sind lediglich die ausgesuchten Problemfälle mit dem Prototyp behandelbar. Er ist so konzipiert, dass er von Experten des Anwendungsgebiets zu konfigurieren ist, nach dem Start aber ohne Benutzerinterventionen selbständig zu Ergebnissen kommt und, falls gewünscht, in einer Art Dauerüberwachungsmodus verharrt. Für die Konfiguration, worunter auch die Eingabe relevanter Wissensteile zu verstehen ist, sind entsprechende Expertenkenntnisse aus den Bereichen Geotechnik, Geodäsie und Tunnelbau unbedingt nötig, die Ausgaben sind jedoch auch weniger qualifizierten Benutzern weitgehend verständlich. Die genannten Kenntnisse umfassen vielfach empirisches, intuitives und subjektives Wissen wie Prognosen, Einschätzungen oder Bewertungen. Der Prototyp bietet zwar in gewissen Details modifizierbare, im Prinzip aber feste Modelle bzw. Methoden zur Eingabe und Verarbeitung dieses Wissens, er enthält es jedoch nicht apriori. In diesem Sinne stellt er kein *black box*- System dar. Sein primärer Verwendungszweck ist das automatische, wissensunterstützte Erkennen und Berichten sogenannter *Auffälligkeiten* in den primären Ausgangsdaten. Aus diesen leitet er im Sinne einer Inferenz keine weiteren Schlüsse ab. Weiterführende Schlussfolgerungen wie mögliche Ursachen oder Maßnahmen können jedoch, sofern sie vorab einer Auffälligkeit zugeordnet und eingegeben werden, informativer Bestandteil der Ausgaben sein.

Von untergeordnetem Interesse waren bei der Entwicklung Aspekte wie Komfort der Benutzerschnittstelle oder auch die Art und Weise der Behandlung von Systemabstürzen. Sehr wohl aber wurden Aspekte wie Laufzeiteffizienz, Adäquatheit und Einfachheit der Repräsentationen, Erweiterbarkeit und Modularität der Wissensbasis, Transparenz der Lösungsfindung sowie Verständlichkeit der Ausgaben beachtet. Letztere bestehen hauptsächlich aus Berichtsdokumenten. Der Prototyp bewirkt keine sonstigen Aktionen wie z.B. Alarmierungen (akustisch, SMS, e-mail, etc.), was für eine tatsächliche Einsetzbarkeit als Überwachungssystem im Anwendungsgebiet natürlich nötig wäre. Ebenso werden keine Visualisierungen direkt erzeugt. Auf die Möglichkeit fehlerhafter Ergebnisse und deren möglicher Ursachen wird in den Ausgaben hingewiesen.

5.2.2 Benutzerschnittstelle

Die Eingabe bestimmter Wissensteile kann mit Hilfe eines beliebigen Texteditors unter Beachtung gewisser Formatvorschriften erfolgen. Der entsprechende externe Programmaufruf eines solchen Editors lässt sich im Konfigurationsmenü (**Settings**, Abb. 37) des Prototyps angeben. Elementare Konfigurationsparameter (z.B. Zugriffspfade zu bzw. Namen von System-, Fakten- und Originaldateien), sind unter demselben Menüpunkt direkt einzugeben. Die geordnete Übernahme des in den Dateien vorliegenden oder anhand einzelner Parameter spezifizierten Faktenwissens in das working memory erfolgt systemgesteuert. Ebenso wird jenes Wissen, welches in Form von Regeln vorliegt, automatisch geladen. Diese sind jedoch fest, d.h., der Benutzer hat keinen direkten Zugriff auf deren Syntax. Er kann sie nur einzeln auswählen und sie zu Regelsets zusammenfassen.

Ausgaben bilden hauptsächlich automatisch generierte HTML-Berichtsdateien. Diese können wahlweise über den wxCLIPS - eigenen HTML-viewer vom Prototyp aus, prinzipiell aber auch mit anderen HTML-browsern betrachtet werden (netscape, internet explorer,...). *Links* in diesen Dateien verweisen auf bestimmte Abschnitte eines festen HTML-Hauptdokuments.

Weiters werden vom Prototyp Textdateien erstellt, welche Steuerparameter zur automatischen Erstellung geotechnischer Diagramme beinhalten. Diese Dateien sind dazu gedacht, von einem geotechnischen Auswerteprogramm über eine Schnittstelle eingelesen zu werden und eine automatische Diagrammerstellung anzustoßen. Konkret wurde diese Schnittstelle im Rahmen dieser Arbeit jedoch auf seiten eines solchen Auswerteprogramms nicht realisiert. Am Bildschirm selbst werden nur gewisse Status- und Fehlermeldungen (Abb. 37) angezeigt.

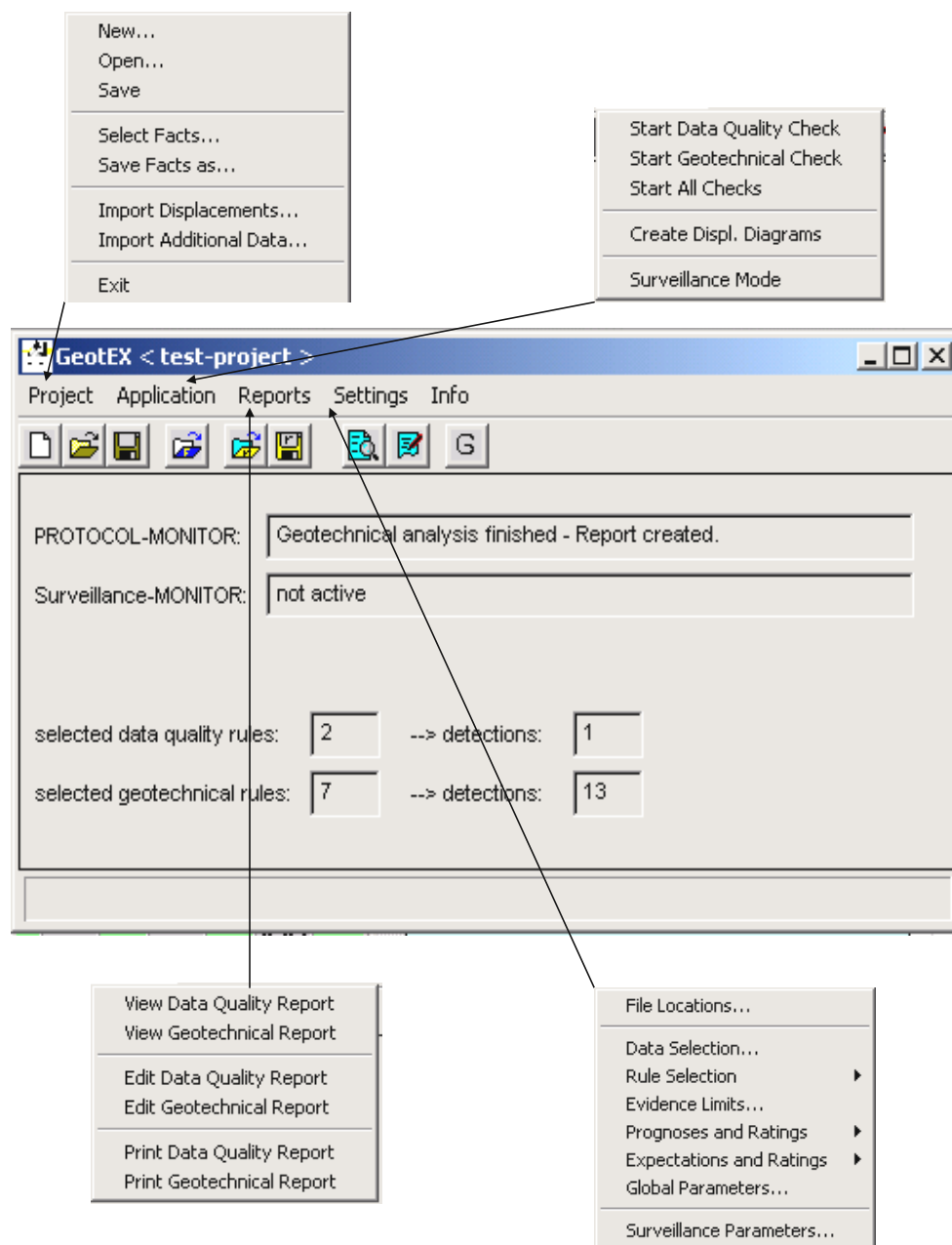


Abb. 37: Benutzeroberfläche und Menustruktur des Prototyps

5.2.3 Architektur und Komponenten

Einige Begriffe in den Abbildungen 37 und 38 bedeuten einen Vorgriff auf Inhalte der noch folgenden Kapiteln 5.3 bis 5.5. Architektur und Komponenten des Prototyps sollen aber dennoch an dieser Stelle im Überblick erläutert werden.

Die relevanten Eingangskomponenten bilden zunächst die primären und sekundären Ausgangsdaten (Komponenten 1 und 2, Abb. 38). Sie liegen in ihren originären Formaten in einzelnen Dateien vor, deren Zugriffspfade im Menüpunkt `File Locations...` (Abb. 37) vorab zu konfigurieren sind. Sie werden mittels Funktionen hinter den Menüpunkten `Import Displacements...` bzw. `Import Additional Data...` in die definierten Formstrukturen von Fakten transformiert (5 und 6) und in eigenen Dateien gespeichert (9 und 10). Dies erfolgt in ähnlicher Weise, jedoch automatisch und im Hintergrund, auch für weitere (in den Kapiteln 5.3 und 5.4 beschriebene) in Textdateien vorliegende Wissensteile (3 und 4 \rightarrow 5 \rightarrow 7 und 8). Andere Funktionen berechnen ebenso automatisch aus primären Ausgangsdaten und sogenannten Prognosen und Erwartungen bestimmte Abweichungen und Bewertungen und legen diese in zusätzlichen Faktendateien ab. (1, 3 und 4 \rightarrow 5 \rightarrow 9). Die zentrale Komponente stellt das working memory dar (12). Nach Aufruf entsprechender Menüpunkte `Start Data Quality Check` oder `Start Geotechnical Check` (Abb. 37) werden die gerade benötigten Faktendateien in das working memory geladen. Zusätzlich werden Konfigurationsparameter in Steuerfakten übersetzt und geladen (11). Danach werden die in verschiedenen Dateien befindlichen Regeln (13) hinzugefügt und der Inferenzprozess gestartet. Am Ende liegen die Ergebnisdateien vor (14 und 15).

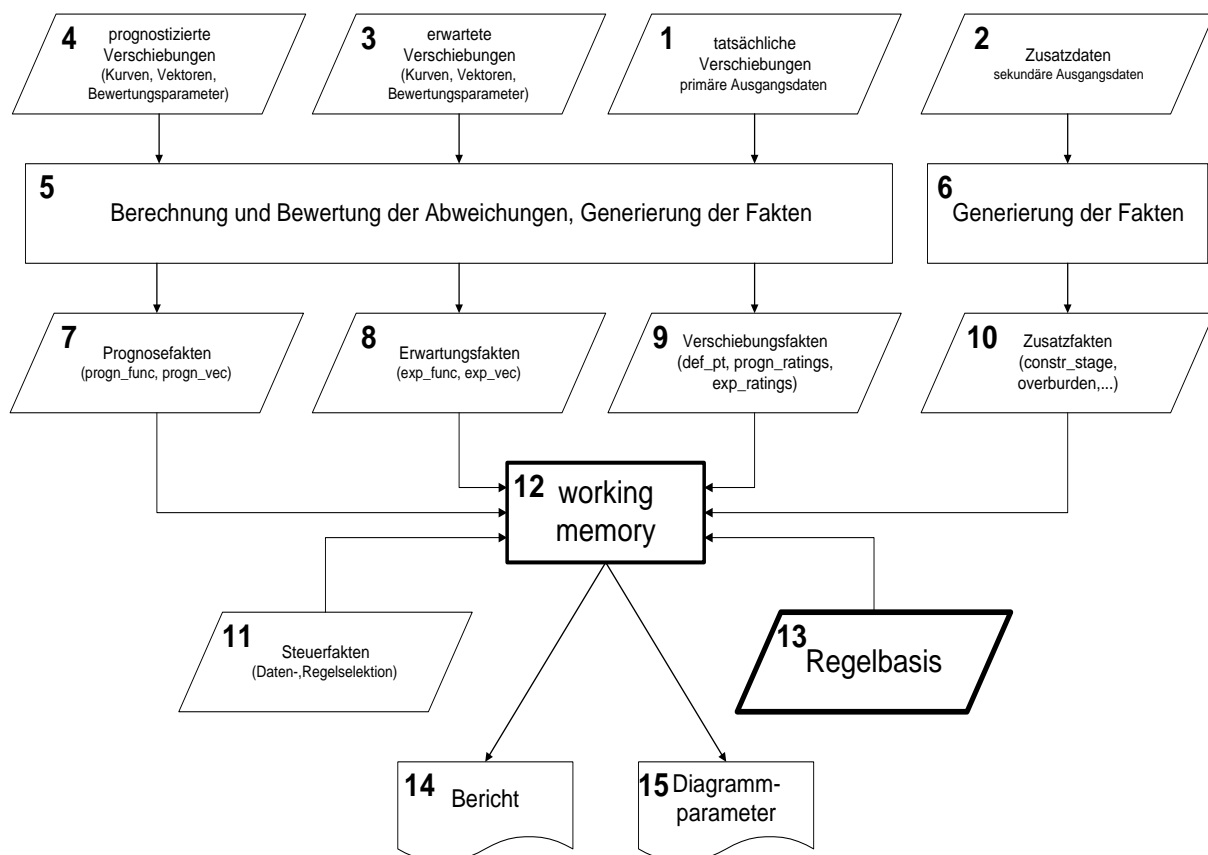


Abb. 38: Architektur und Komponenten des Prototyps

Die erwähnten Regeln können entsprechend der Art ihrer Aktionen in **Ableitungsregeln** und **Berichtsregeln** unterteilt werden. Ableitungsregeln führen Berechnungen aus und / oder verändern das working memory, enthalten jedoch keine Ausgabebefehle. Hinsichtlich ihrer Prioritätszahlen sind sie bis auf wenige Ausnahmen gleichrangig. Berichtsregeln sortieren Ergebnisse und setzen in bausteinhafter Form die Ergebnisdateien zusammen. Sie werden gleichzeitig mit den Ableitungsregeln geladen, sind diesen aber hierarchisch untergeordnet, d.h., ihre Prioritätszahlen sind generell kleiner. Die gewünschte Gliederung der Dateiinhalte entspricht dabei den Prioritätszahlen der Berichtsregeln, die wiederum vom Benutzer zuvor konfiguriert werden können (Menüpunkt **Rule Selection...**, Abb.37). Es werden die Ergebnisse also thematisch sortiert. Geladen werden prinzipiell immer alle Regeln aus allen, einem bestimmten Auswertespekt zugeordneten Regel-dateien. Feuern können davon jedoch nur die im selben Menüpunkt selektierten Regeln. Für jede selektierte Regel wird ein Steuerfakt (z.B. rule 3) generiert, jede Ableitungsregel hat einen solchen ihr zugeordneten Steuerfakt im Bedingungsteil.

Auf weitere Details zum Prototyp wird im Verlauf der nun folgenden Kapiteln an entsprechenden Stellen hingewiesen (insbesondere in Kapitel 5.5.4).

5.3 Repräsentation der primären Ausgangsdaten

```
(deftemplate MAIN::def_pt
  (slot r_Nr          (type INTEGER)          ; running data set nr.
                    (range 1 ?VARIABLE))
  (slot r_StatNr     (type INTEGER)          ; running station nr.
                    (range 1 ?VARIABLE))
  (slot stat_Id      (type INTEGER)          ; station ID
                    (range 1 ?VARIABLE))
  (slot point_Id     (type INTEGER)          ; point ID
                    (range 1 ?VARIABLE))
  (multislot date    (type ?VARIABLE)        ; measuring date and time
                    (cardinality 3 3))
  (slot status       (type INTEGER)          ; status of data set:
                    (range 0 2)             ; 0...zero-reading
                    (default 1)            ; 1...active reading
                    ; 2...inactive reading
  (slot last         (type INTEGER)          ; info-flag for data set:
                    (range 0 1)             ; 0...any reading
                    (default 0)            ; 1...last reading
  (slot MS           (type FLOAT)           ; measured station [m]
  (slot MH           (type FLOAT)           ; measured horiz. offset [m]
  (slot MV           (type FLOAT)           ; measured vertical offset [m]
  (slot abs_S        (type FLOAT)           ; abs. long. displacement [m]
  (slot abs_H        (type FLOAT)           ; abs. horiz. displacement [m]
  (slot abs_V        (type FLOAT)           ; abs. vert. displacement [m]
  (slot rel_S        (type FLOAT)           ; rel. long. displacement [m]
  (slot rel_H        (type FLOAT)           ; rel. horiz. displacement [m]
  (slot rel_V        (type FLOAT)           ; rel. vert. displacement [m])
```

Abb. 39: CLIPS-Syntax zur Repräsentation der primären Ausgangsdaten im Prototyp

Primäre Ausgangsdaten für die geotechnische Interpretation sind die achsbezogenen Koordinaten *S*, *Q* und *h* der Verschiebungspunkte. Ihre charakteristischen Eigenschaften werden in Kap. 4.1.1 beschrieben und bewertet. Im Prototyp wird dieses Faktenwissen (ein konkreter Messdatensatz) unter Verwendung des CLIPS-Konstrukts `DEFTEMPLATE` repräsentiert (Abb. 39).

Zunächst orientiert sich diese Repräsentation an der Datenstruktur der in dieser Arbeit genutzten Verschiebungsdaten. (Programm `DEDALOS`, Kapitel 4.1.1). Jedoch werden zusätzliche Informationen wie die laufende Nummer der Messung (slot `r_Nr`), die laufende Nummer des Messquerschnitts (slot `r_StatNr`), ein flag (slot `last`), der kennzeichnet, ob es sich um die letzte (aktuellste) Messung des Punktes handelt sowie die berechneten Absolutverschiebungen (slots `abs_S`, `abs_H`, `abs_V`) gegenüber der Nullmessung und die Relativverschiebungen (slots `rel_S`, `rel_H`, `rel_V`) aufeinanderfolgender Messungen für die einzelnen Verschiebungskomponenten hinzugefügt. Der multislot `date` beinhaltet die Informationen des Datums und der Uhrzeit der Messung, und zwar sowohl als dezimale Anzahl der Tage, die seit einem bestimmten Nulldatum (z.B. das Datum des Projektbeginns) vergangen sind, als dezimale Anzahl der Tage, die seit der Nullmessung des jeweiligen Messpunktes vergangen sind, als auch in einem stringorientierten Datums- bzw. Zeitformat („dd.momo.yyyy, hh:mm:ss“). Die mehrfache und somit redundante Darstellung des Messzeitpunkts wie auch die Hinzunahme oben angeführter Größen hat den Zweck, ihre numerische Berechnung während der Laufzeit des Inferenzvorgangs zu vermeiden, da dieser sonst erheblich verlangsamt würde. Wie in Kapitel 5.2.3 erläutert, werden mittels einer Vorverarbeitungsprozedur die einzelnen slot-Werte berechnet und gemäß der in Abb. 39 angegebenen generischen Struktur zunächst in eine Datei zwischengespeichert. Nachfolgend ist daraus ein kurzer Abschnitt bestehend aus zwei Messfakten angeführt (Abb. 40).

```
(def_pt (r_Nr 146) (r_StatNr 1) (stat_Id 2) (point_Id 4) (date 50.416667 4.000000 1.11.1999,10:00:00)
(status 2) (MS 1.94368) (MH -5.08952) (MV 1.58599) (abs_S -0.00385) (abs_H 0.02561)
(abs_V -0.03779) (rel_S 0.00053) (rel_H -0.00131) (rel_V -0.00201) )

(def_pt (r_Nr 147) (r_StatNr 1) (stat_Id 2) (point_Id 4) (date 51.416667 5.000000 2.11.1999,10:00:00)
(MS 1.94421) (MH -5.09083) (MV 1.58398) (abs_S -0.00332) (abs_H 0.02430)
(abs_V -0.03980) (rel_S 0.00083) (rel_H -0.00031) (rel_V -0.00321) )
```

Abb. 40: Textausschnitt bestehend aus zwei Fakten der primären Ausgangsdaten

Diese Datei wird nun vom Prototyp über einen entsprechenden Befehl (`load-facts <filename>`) automatisch in das *working memory* geladen. Die primären Ausgangsdaten sind hernach als Menge von Instanzen des `def_pt` (=Deformationspunkt) benannten CLIPS-Konstrukts `DEFTEMPLATE` repräsentiert.

Aus wissensbasierter Sicht handelt es sich dabei um eine *flache* Repräsentation von Faktenwissen. Das gewählte CLIPS-Konstrukt kann auch als besonders einfache Ausprägung eines Frames (siehe auch Kap. 3.5) gesehen werden. Für die beiden slots `status` und `last` wurde explizit ein `<default-attribute>` deklariert (Abb. 39). Die angegebenen Default-Werte (1 bzw. 0) stellen den häufigsten Fall der Werte dieser slots dar. Nur im Falle abweichender Werte in den Ausgangsdaten (z.B. (status 2), Abb. 40) muss der Default-Wert überschrieben werden. Ist dies nicht nötig, kann in der Faktendatei auf die beiden slots verzichtet und die Dateigröße etwas kleiner gehalten werden.

Wird die Datei geladen, werden vom System automatisch die Default-Werte eingesetzt und die Daten auf Konsistenz mit den weiteren Einschränkungen (type, range, cardinality) geprüft.

5.4 Repräsentationen sekundärer Ausgangsdaten

Aufgrund der großen Zahl verschiedenartiger sekundärer Ausgangsdaten (Kapitel 4.1.2) werden im Rahmen dieser Arbeit nur die Repräsentationen zweier Datenarten exemplarisch beschrieben.

1) Baufortschrittsdaten

In Analogie zu den Verschiebungsdaten eignet sich das CLIPS-Konstrukt DEFTEMPLATE auch für die Repräsentation des Faktenwissens über den Baufortschritt (Abb. 41):

```
(deftemplate MAIN::constr_stage
  (slot r_Nr      (type INTEGER)           ; running data set nr.
              (range 1 ?VARIABLE))
  (multislot stage_ID (type ?VARIABLE)     ; ID and name of construction stage
              (cardinality 2 2))
  (multislot date   (type ?VARIABLE)     ; measuring date
              (cardinality 2 2))
  (slot MS        (type FLOAT))          ; measured station [m]
)
```

Abb. 41: CLIPS-Syntax zur Repräsentation der Baufortschrittsdaten im Prototyp

In der Repräsentation ist berücksichtigt, dass die Anzahl der Bauphasen (Kalotte, Strosse, Sohle,...) theoretisch unbeschränkt und im Verlauf eines Projekts auch veränderlich sein kann. Der Zeitpunkt der Messung bzw. Erfassung wird der Einfachheit halber ähnlich jener der Verschiebungsdaten strukturiert, wiewohl für die Praxis eine sekundengenaue Angabe aktueller Ortsbruststationen nicht nötig wäre. Es ist ersichtlich, dass das Wissen über die Ortsbruststationen zwischen den diskreten Zeitpunkten nicht explizit repräsentiert, also auch nicht für jeden beliebigen Zeitpunkt vorhanden ist. Eine Repräsentation könnte hierfür prozedural über eine Interpolationsvorschrift erfolgen. Zu bedenken ist jedoch, dass beispielsweise eine lineare Interpolation der Daten speziell im Falle zyklischer Vortriebe nicht oder nur beschränkt zulässig ist. Dieser Umstand wird dann zu einem konkreten Problem, falls diese Daten nur in relativ großen Zeitabständen (z.B. nur einmal täglich) und auch nicht für jene eigentlich interessierenden Zeitpunkte, zu denen die Verschiebungsmessungen stattfinden, vorliegen (siehe dazu auch Kap. 5.5.1).

Um digitale, in anderen Formaten vorliegende Baufortschrittsdaten in die angegebene Struktur transformieren zu können, ist wiederum eine Vorverarbeitungsprozedur notwendig. Im Rahmen der Arbeit wurde diese für das in Kap. 4.1.2 beschriebene Format erstellt. Ergebnis dieser Prozedur ist zunächst eine Datei, bestehend aus den einzelnen Instanzen des `constr_stage` benannten Konstrukts DEFTEMPLATE. Einen Auszug daraus zeigt Abb. 42.

```
(constr_stage (r_Nr 156) (stage_ID 1 Kalotte) (date 51.416667 2.11.1999,10:00:00) (MS 78.0) )
(constr_stage (r_Nr 157) (stage_ID 2 Strosse) (date 51.416667 2.11.1999,10:00:00) (MS 52.0) )
```

Abb. 42: Textausschnitt bestehend aus zwei Fakten der Baufortschrittsdaten

Diese Datei wird vom Prototyp vorab erzeugt und hernach wiederum in das *working memory* geladen. Ein konkretes Beispiel der Nutzung dieses Wissens beschreibt Kapitel 5.5.1. Theoretische Überlegungen, wie Sekundärdaten noch weiter genutzt werden können, finden sich in Kap. 7.

2) Bauwerkskenndaten - Überlagerungshöhen

Eine wesentliche Information zur Interpretation von Verschiebungen bilden, wie auch aus den geotechnischen Berichten in Kapitel 4.5 hervorgeht, die Überlagerungshöhen. Sie beschreiben den vertikalen Abstand von der Tunnelfirste zur Geländeoberfläche und bedeuten ein Wissen, das in aller Regel bereits vor Projektbeginn vorliegt. Es wird wie folgt generisch repräsentiert (Abb. 43):

```
(deftemplate MAIN::overburden
  (slot MS      (type FLOAT))      ; tunnel station [m]
  (slot h      (type FLOAT))      ; height of overburden [m]
  (slot h_int  (type SYMBOL))     ; linear interpolation [n...no, y...yes]
)
```

Abb. 43: CLIPS-Syntax zur Repräsentation der Überlagerungshöhen im Prototyp

Die Überlagerungshöhen sind bei diskreten Stationierungen anzugeben. Für dazwischen liegende Bereiche kann das nötige Wissen mittels linearer Interpolation prozedural ermittelt werden. Ob zur nächsten Stützstelle interpoliert werden darf oder Überlagerungswissen hierfür fehlt, ist gesondert anzugeben (slot `h_int`). Nicht-Wissen wird in diesem Fall somit indirekt mitrepräsentiert.

5.5 Repräsentationen und Anwendungen des Analysewissens

Für die Beschreibung von Repräsentationen des Analysewissens wird gemäß der in Kapitel 4.3 vorgenommenen Unterteilung vorgegangen.

5.5.1 Öffentliches, projektunabhängiges Fachwissen

In Kapitel 4.3, S. 52 ff wird erläutert, dass vor allem relative (seltener absolute), zeitliche oder räumliche Entwicklungen der Verschiebungen *projektunabhängig* als geotechnisch auffällig betrachtet werden können. Beispiele hierfür - unter der Annahme korrekter Messdaten - sind:

- das Auftreten von aus dem Messquerschnitt hinaus weisenden Verschiebungsvektoren (z.B. Firsthebungen),
- jedes plötzliche, bruchartige Auftreten von Verschiebungen,
- jede Zunahme von Verschiebungsgeschwindigkeiten ohne bautechnische Ursache.

Exemplarisch wurde im Prototyp die Repräsentation des Wissens aus dem dritten Beispiel der obigen Liste vorgenommen, da hierfür die Einbeziehung sekundärer Ausgangsdaten – und zwar der Baufortschrittsdaten - nötig wird. Zunächst ist das zu lösende Problem genauer zu formulieren.

Formulierung des Problems

1. *Es wird grundsätzlich erwartet, dass die Beträge der auf eine konstante Zeiteinheit bezogenen, relativen Verschiebungszuwächse aufeinanderfolgender, diskreter Messungen eines Messpunkts mit der Zeit kleiner werden. Eine Zunahme ist daher auffällig.*
2. *Falls Vortriebsaktivitäten in der Umgebung eines Messpunkts stattfinden, ist eine besondere Situation (Ausnahme) gegeben. In diesem Fall ist eine Zunahme nicht unbedingt auffällig, sondern kann gegebenenfalls durch den Einfluss dieser Aktivitäten erklärt werden.*

Falls Wissen über das *erwartete Ausmaß* eines durch Vortriebsaktivitäten bewirkten erneuten Anwachsens der Relativverschiebungen vorhanden ist, so kann dieses Anwachsen dann auffällig sein, wenn es *stärker oder früher als erwartet* ausfällt. Dieses Wissen ist jedoch bereits projektspezifisch, wofür in Kapitel 5.5.2 andere Repräsentationsbeispiele zu finden sind.

Entwicklung der Problemlösung

Der Begriff *Auffälligkeit* soll für das gewählte Beispiel *scharf* und *eindeutig* definiert werden, d.h., Auffälligkeit liege vor oder nicht. Wie in Kap. 4.3, S. 54 erläutert, könnte man Auffälligkeit auch skalieren und beispielsweise vom Ausmaß der Verschiebungszunahme abhängig machen. Hierfür wäre allerdings wie erwähnt projektspezifisches Wissen erforderlich. Um eine projektunabhängige Repräsentation zu versuchen, wird *für dieses Problem* daher die eindeutige Definition gewählt.

Ein eindeutiges Ergebnis ist also abzuleiten, obwohl dennoch zwei Quellen der Unsicherheit vorliegen. Zum einen muss die Verschiebungszunahme anhand von Messdaten ermittelt werden, die grundsätzlich mit einer *Messungenauigkeit* behaftet sind. Zum anderen ist allgemein unsicher (und wieder projektspezifisch), wie weit der räumliche Einflussbereich einer Bauaktivität reicht. Um das zweite Problem projektunabhängig zu bewältigen, soll es zunächst nicht gelöst sondern umgangen werden, indem jede messtechnisch signifikante Verschiebungszunahme als auffällig konstatiert und gemeldet werden soll. Gleichzeitig werden die räumlichen Abstände des betreffenden Messpunktes zu den Ortsbruststationen jeder Bauphase für den Zeitpunkt der auffälligen Messung bestimmt. Sofern dieser Abstand größer als ein bestimmter empirischer Wert ist, soll informiert werden, dass ein Zusammenhang mit einer Bauaktivität nicht bestehen kann, sofern der Abstand kleiner ist, ein Zusammenhang als immerhin möglich konstatiert werden. Der Wert ist dabei so groß zu wählen, dass ausserhalb des durch ihn festgelegten Bereiches ein Zusammenhang zwischen Verschiebungszunahme und Bauaktivität kategorisch auszuschließen ist und daher in jedem Fall Auffälligkeit vorliegt. Zusätzlich muss dabei noch die Zeitdifferenz zwischen auffälliger Verschiebungsmessung und Ortsbrusterfassung mitberücksichtigt werden, um zu *wissen*, ob die Ortsbruststation für den Messzeitpunkt auch repräsentativ ist, was durch einen weiteren empirischen Wertes festgelegt werden kann.

Das Problem der Messungenauigkeit soll durch Angabe eines globalen Toleranzwertes (Variable *?*tolerance**) gelöst werden, wonach eine Verschiebungszunahme erst ab einer bestimmten Größenordnung als messtechnisch signifikant beurteilt wird. Die Problemlösung wird nun anhand zweier Regeln repräsentiert. Abb. 44 zeigt die Regelsyntax (CLIPS-Konstrukt *DEFRULE*) zunächst für das Erkennen einer auffälligen Verschiebungszunahme am Beispiel der Setzungen.

```
(defrule MAIN::check_remarkable_settlement_increase
(rule 101.2)
(def_pt (r_Nr ?i) (stat_Id ?s) (point_Id ?p) (date ? ?d1 ?) (rel_V ?dH2) (status 0| 1))
(def_pt (r_Nr ?k&: (= ?k (+ ?i 2))) (stat_Id ?s) (point_Id ?p) (date ? ?d3 ?) (status 1))
(def_pt (r_Nr ?j&: (= ?j (+ ?i 1))) (stat_Id ?s) (point_Id ?p) (date ? ?d2 ?) (status 1)
(rel_V ?dH3&: (eq (significant ?dH2 ?dH3 ?d1 ?d2 ?d3 ?*tolerance*) true)))
(not (outlier_def_pt (r_Nr ?i)))
(not (outlier_def_pt (r_Nr ?j)))
(not (outlier_def_pt (r_Nr ?k)))
=>
(assert (settlement_increase ?k)))
```

Abb. 44: Regelsyntax für das Erkennen einer auffälligen Setzungszunahme

Die Regel besteht aus sieben Vorbedingungen und einer Aktion und ist wie folgt zu interpretieren:

1. Sie kommt nur zur Anwendung, falls dies vom Experten auch explizit erwünscht ist, das heißt, falls ein entsprechender Fakt (`rule 101.2`) existiert. Die Generierung dieses Fakts erfolgt automatisch, falls die Regel im Konfigurationsmenu des Prototyps selektiert wurde. Jeder Regel wird hierzu eine eigene Regelnummer zugewiesen.
2. Die drei Vorbedingungen (`def_pt`) spezifizieren nun, dass es sich um drei unmittelbar aufeinanderfolgende Messungen `?i`, `?j` und `?k` ein und desselben Messpunktes handeln muss, wovon nur die erste eine Nullmessung sein darf (`status 0|1`), die beiden weiteren aktive Folgemessungen sein müssen (`status 1`) und weisen Stationierung und Punktnummer den Variablen `?s` und `?p` zu. Weiters wird eine boolesche Funktion (`significant`) auf die Relativsetzungen `?dH2` und `?dH3` zwischen den Messzeitpunkten `?d1`, `?d2`, `?d3` angewandt, welche prüft, ob unter Berücksichtigung einer globalen, empirischen Messungenauigkeit `?tolerance` `?dH3` als signifikant größer als `?dH2` anzusehen ist. Wird diese Prozedur zu `true` ausgewertet, ist eine Unterbedingung an `?dH3` erfüllt. Im Grunde bildet diese Prozedur den Kernbaustein für das Erkennen einer Auffälligkeit.
3. Die letzten drei Vorbedingungen (`not (outlier_def_pt)`) legen fest, dass keine der drei zuvor betrachteten Messungen eine fehlerhafte Messung (z.B. ein Ausreisser) sein darf. Es wird daher unterdrückt, dass über fehlerhafte Messungen inferenziert wird. Dies bedeutet aber auch, dass das Erkennen fehlerhafter Messungen und ihre Repräsentationen durch entsprechende Fakten (`outlier_def_pt`) bereits vor Anwendung dieser Regel erfolgt sein muss, wofür andere datengetriebene Regeln, die erst in Kap. 5.5.3, S. 95 ff erklärt werden sollen, dienen.
4. Die einzige Aktion der Regel besteht in der dynamischen Erzeugung des Fakts (`settlement_increase ?k`), welcher auf die laufende Nummer `?k` der auffälligen Messung verweist.

Die zweite Regel (Abb. 45) steuert die Ausgabe des Systems:

```
(defrule MAIN::report_settlement_increase_and_construction_stages
  (settlement_increase ?i)
  (def_pt (r_Nr ?i) (Stat_Id ?s) (Point_Id ?p) (date ?d ? ?t) (MS ?MS) (last ?l))
  (constr_stage (stage_Id ?n ?sname) (date ?sd1 ?td1) (MS ?cMS))
  (not (constr_stage (stage_Id ?n ?) (date ?sd2&: (< (abs (- ?sd2 ?d)) (abs (- ?sd1 ?d))) ? )))
=>
  (report_settlement_increase_and_cs ?l ?s ?p ?t ?MS ?cMS ?sname ?td1 ?*var1* ?*var2*)
  (prepare_diagram ?s ?p ?d ?n ?sd1)
)
```

Abb. 45: Regelsyntax für das Berichten einer auffälligen Setzungszunahme und der Bauphasensituation

Sie besteht aus vier Vorbedingungen und zwei Aktionen und ist wie folgt zu lesen:

1. Es muss eine durch die vorhergehende Regel als auffällig erkannte Setzungszunahme, also konkret ein Fakt (`settlement_increase ?i`) vorliegen. Die laufende Nummer der betreffenden Messung wird der Variablen `?i` zugewiesen.

2. Die für die Berichterstattung relevanten Daten des dem Index ?i entsprechenden Messfakts (def_pt) werden den weiteren Variablen ?s, ?p, ?d, ?t und ?MS zugewiesen. Es wird speziell beachtet, ob es sich um die letzte (aktuellste) Messung handelt, was in der Variablen ?l zum Ausdruck kommt.
3. Die nächsten Vorbedingungen (constr_stage) und (not(constr_stage)) suchen aus allen vorhandenen Baufortschrittsfakten einer Bauphase jenen aus, der dem Messzeitpunkt ?d der auffälligen Messung zeitlich am nächsten ist. Die diesem Zeitpunkt entsprechende Ortsbrustposition der Bauphase wird der Variablen ?cMS, ihr Erfassungszeitpunkt der Variablen ?sd1 zugewiesen. Die Regel feuert für jede Bauphase ?n genau einmal. Sie feuert allerdings überhaupt nicht, falls gar keine Baufortschrittsdaten vorhanden sind. Für diesen Fall ist eine andere, zusätzliche Berichtsregel verantwortlich.
4. Die erste Aktion der Regel besteht im Aufruf einer Berichtsfunktion (report_settlement_increase_and_cs), die die gefundene auffällige Messung samt der gefundenen Bauphase ausgibt. Der Ausgabertext lautet nun je nach Abstand des Messpunkts von der Ortsbrust der Bauphase und der Zeitdifferenz zwischen Verschiebungsmessung und Ortsbrusterfassung unterschiedlich. Die eingangs erwähnten empirischen, globalen Variablen ?*var1* und ?*var2* legen dies fest. Für eine signifikante Setzungszunahme, für die die gefundene Bauphase noch oder bereits weiter als die Variable ?*var1* entfernt liegt, wird ausgegeben, dass das Phänomen durch die Nähe dieser Bauphase nicht erklärt werden kann. Im anderen Fall wird angegeben, dass ein Zusammenhang grundsätzlich bestehen könnte. Dieser ist allerdings vom Benutzer weiter zu entscheiden, was anhand der mitausgegebenen Parameter durchgeführt werden kann. Sind die Bauphasendaten jedoch gemäß ?*var2* zeitlich nicht repräsentativ, wird dies entsprechend erwähnt (siehe Abb. 46). Die Variable ?l erlaubt die Aufnahme des zusätzlichen Hinweises in die Ausgabe, dass es sich um die letzte (aktuellste) Messung eines Punktes handelt und daher auch ein noch nicht aufdeckbarer Messfehler vorliegen könnte. Die Ausgabeüberschrift stellt einen HTML-link dar, welcher zu Kontext-Informationen über die Regel führt.

[REMARKABLE INCREASE of SETTLEMENT VELOCITY ASSUMED !](#)

Please note: The detection rule is based on a very simple empirical method and therefore only delivers a possible candidate – manual confirmation is required !

- TM: 9 NR: 1 measuring_date: 1.11.2001, 10:00:00 exact Station: 9.14 m
 related excavation data:
Kalotte is at station 55.6 m measured at 1.11.2001, 8:00:00
 → increase **can not** be explained by excavation of **Kalotte** because Kalotte is more than 20m ahead

Strosse is at station 7.5 m measured at 1.11.2001, 8:00:00
 → increase **could** be explained by excavation of **Strosse** because Strosse is only 1.6m behind

Sohle is at station 5.2 m measured at 30.10.2001, 8:00:00
 → increase **could** be explained by excavation of **Sohle** because Sohle is only 3.9m behind
 → **but** Sohle was last measured 48 hours before assumed settlement increase

Abb. 46: Ausgabebeispiel für eine mögliche auffällige Setzungszunahme und der Bauphasensituation

5. Die zweite Aktion ruft eine Funktion (`prepare_diagram`) auf, welche alle Parameter zur Erstellung eines den Sachverhalt darstellenden Diagramms in eine Datei speichert.

Diskussion der Problemlösung

Relevante Eigenschaften, Einschränkungen und mögliche Erweiterungen der auf Basis dieser beiden Regeln vorgenommenen Anwendung projektunabhängigen Fachwissens sind:

- Mögliche Zusammenhänge mit Vortriebsaktivitäten werden generell als unsicher qualifiziert (*could be*) und sind vom Benutzer noch weiter zu interpretieren. Auszuschließende Zusammenhänge können hingegen sicher behauptet werden (*can not be*).
- Das Ergebnis ist von der Qualität der verfügbaren Baufortschrittsdaten stark abhängig. Liegen keine Informationen über den Ortsbruststand einer Bauphase in einer für den auffälligen Messzeitpunkt repräsentativen zeitlichen Nähe vor, wie dies in Abb.46 für die Sohle angegeben wird, so wird die Aussage besonders unsicher. Wie bereits erwähnt, wäre es machbar, die Ortsbruststände auf den Messzeitpunkt zu inter- oder extrapolieren. Dies könnte jedoch zu unrichtigen Ergebnissen führen (siehe Kapitel 5.4). Mittels Erweiterung der Berichtsregel ließe sich nicht nur über die Positionen der Ortsbruststände, sondern auch über die momentanen Vortriebsgeschwindigkeiten berichten. Damit kann auch ausgegeben werden, wie schnell bzw. ob überhaupt die jeweilige Bauphase gerade vorgetrieben wird.
- Eine Erweiterung der Ausgabe, etwa um die numerischen Setzungsbeträge, wäre ebenso denkbar. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass ein Experte, falls eine derartige Meldung vom System ausgegeben wird, in jedem Fall ein entsprechendes geotechnisches Diagramm zur weiteren Beurteilung heranziehen möchte, welches dann rasch generiert werden kann.
- Die boolesche Funktion (`significant`), mit deren Hilfe eine auffällige Setzungszunahme als solche erkannt wird, betrachtet zwei zeitlich aufeinander folgende Relativsetzungen eines Messpunkts unter Berücksichtigung eines empirischen Signifikanzschwellwertes `*tolerance*`. Liegt die Differenz der beiden auf eine zeitliche Einheit normierten Relativsetzungen unterhalb dieses Schwellwertes, wird die Funktion zu `false` ausgewertet und es erfolgt keine Ausgabe. Das bedeutet, dass mit wachsender Größe dieses Schwellwertes auch die Setzungszunahme entsprechend stark ausfallen muss, um als auffällig konstatiert zu werden. Ist dieser Wert sehr klein, werden gegebenenfalls sehr viele Messungen (unter Umständen auch zu unrecht) als auffällig diagnostiziert. In der vorliegenden Form eignet sich die Funktion demnach für das schnellstmögliche (auf Basis dreier Messungen) Erkennen plötzlich auftretender starker Setzungszuwächse. Für den Fall kleiner und nur langsam ansteigender Zuwächse, was beispielsweise bei Messungen in sehr kurzen Zeitabständen zu erwarten ist, müsste die Analyse mehr als nur drei Folgemessungen in Betracht ziehen, was anhand ähnlicher, weiterer Regeln und einer Modifikation der booleschen Funktion bewerkstelligt werden kann. Die Systemantwort kann dann allerdings auch erst später -nach Vorliegen dieser Messungen - erfolgen.
- In den Regeln werden mathematische Operationen ausgeführt. Diese sind im Prinzip zwar sehr einfach, führen aber gegenüber einer rein symbolischen Wissensverarbeitung, wofür wissensbasierte Systeme bevorzugt ausgelegt sind, zu etwas längeren Inferenzlaufzeiten.
- Die Vorgehensweise ist heuristisch (= *der Entdeckung dienend*). Auf die Unsicherheit der Ergebnisse wird ausschließlich sprachlich anhand der Textbausteine „*assumed*“, „*could*“ und einer Aufforderung „*Please note*“ zur manuellen Kontrolle hingewiesen.

- Von besonderem Vorteil datengetriebener Inferenz ist nun, dass mittels weiterer Regeln kausal von derartigen Einzelereignissen auf Gesamterscheinungen geschlossen werden kann. Weisen beispielsweise alle Messpunkte eines Messquerschnitts auffällige Setzungszuwächse während einer Messepoche auf, so lässt sich dies durch eine eigene Regel erkennen und entsprechend zusammengefasst berichten. Ebenso, falls ein und derselbe Messpunkt mehrmals unmittelbar hintereinander dieses Phänomen zeigt und deshalb bereits besonders auffällig ist. Weist ein Messpunkt (oder ein ganzer Messquerschnitt) gleichzeitig Setzungs- und auch Längs- oder Querverschiebungszuwächse auf, kann dies ebenfalls erkannt und berichtet werden. Die Kausalketten wachsen daraufhin schrittweise in die Tiefe. Die Vielzahl theoretisch möglicher, derartiger Schlussfolgerungen ist auf die für das Anwendungsgebiet sinnvollen zu beschränken. Systemmeldungen von Einzelereignissen sind zu Gunsten aggregierter Ereignisse zu unterdrücken, um redundante Ausgaben zu vermeiden.

Auswerteergebnisse hierzu werden in Kapitel 6.1 präsentiert und diskutiert.

5.5.2 Öffentliches, projektspezifisches Fachwissen

Wie in Kapitel 4.3, S. 54 ff erläutert, werden für die geotechnische Beurteilung den auftretenden Verschiebungen *prognostizierte* Verschiebungen gegenübergestellt. Diese können für ein Projekt in Form charakteristischer Zeit- Verschiebungskurven oder Vektormuster verfügbar sein. Häufig finden sich aber auch nur prognostizierte Endwerte absoluter oder relativer Verschiebungskomponenten.

Charakteristische Zeit-Verschiebungskurven können beispielsweise aus rheologischen Modellannahmen abgeleitet werden. Im für das Anwendungsgebiet häufigsten Fall konvergieren die Deformationen mit zunehmender Zeit asymptotisch gegen einen Endwert. Typisch ist die Darstellung dieses Verhaltens durch folgende (normierte) Funktion (Abb. 47) [34]:

$$def(t) = 1 - \left(\frac{T}{t+T} \right)^\beta$$

mit:

def(t)	Verformung
T	Relaxationszeit
t	Anzahl der Tage nach dem Ausbruch
β	Konstante

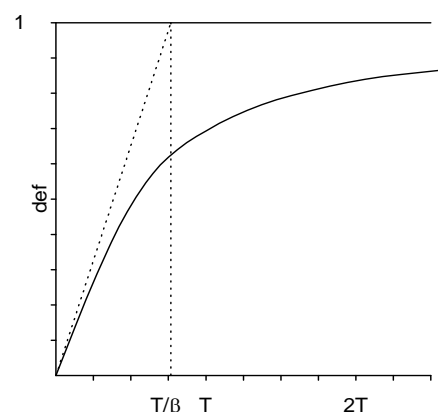


Abb. 47: Charakteristische Verformungskurve

Basierend auf einem anderen einfachen Modell wird die Verformung als Funktion der Zeit t (wie oben) und des Kriechexponenten b (mit $0 \leq b \leq 1$) beschrieben [34]:

$$def(t) = t^b$$

Die prognostizierten, zeitabhängigen Verhaltensweisen, konkret die Parameter der Funktionen, können ihrerseits von Parametern wie Gebirgstyp, Temperatur, Spannungen, etc. abhängig sein.

Neben den Zeit-Verschiebungskurven werden im Tunnelbau zur Prognose von Verformungen Vektormuster von Verschiebungen auf Basis numerischer Simulationen berechnet (Abb.48). Aus diesen können Richtungen und Beträge der prognostizierten Endverschiebungen des Hohlraumrandes entnommen werden.

Job Title : Deformationsprognose - Netzverformungen
From File : test.sav

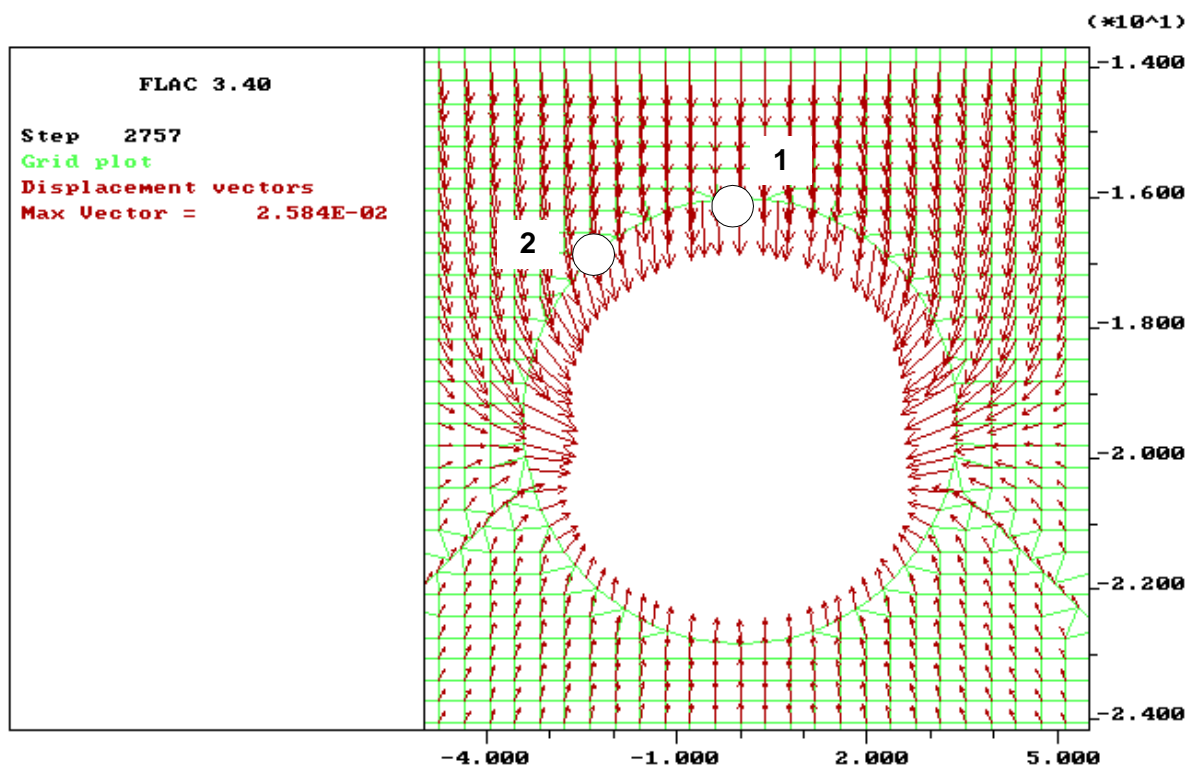


Abb. 48: Prognostizierte Verschiebungsvektoren in einem Tunnelquerschnitt

Liegen derartige Prognosen vor, so kann die mit ihnen in Zusammenhang stehende Problemstellung bei der Beurteilung auftretender Verschiebungen verhältnismäßig einfach wie folgt formuliert werden:

Formulierung des Problems

1. Es wird grundsätzlich erwartet, dass die auftretenden Verschiebungen den Prognosen entsprechen. Ist dies nicht der Fall, so ist dies auffällig.
2. Das Maß der Auffälligkeit ist vom Ausmaß (von der Größenordnung) der Abweichungen der auftretenden Verschiebungen von den prognostizierten Verschiebungen abhängig.

Entwicklung der Problemlösung

Zunächst sind die Prognosen selbst zu repräsentieren. Im Prototyp sind hierfür Eingaben in eine Textdatei vorgesehen (Abb.49). Für zeitabhängige Verschiebungskurven sind hierin Funktionstyp und -parameter sowie für welche Komponente (Setzung, Horizontal-, Längsverschiebung) und für welche Punkte die Funktion gilt, anzugeben.

Typ	Parameter	Komponente	von_Stationierung	bis_Stationierung	PNr
1	-50, 1.5, 0.8	V	100	190	1
0	0	H	100	190	1

Abb. 49: Textauszug aus der Konfigurationsdatei zur Definition prognostizierter Zeit- Verschiebungskurven

Im angeführten Beispiel wird allen Firstpunkten (PNr = 1) innerhalb des Stationierungsbereiches 100 bis 190 ein prognostizierter Setzungsverlauf (Komponente = V) zugewiesen. Der gewählte Funktionstyp (Typ = 1) wird durch drei Parameter (-50, 1.5, 0.8) festgelegt. Es handelt sich dabei beispielsweise um den in Abb. 47 dargestellten Funktionstyp mit den Parametern $T=1.5$ und $\beta = 0.8$. Der Wert -50 ist die prognostizierte Endsetzung in Millimeter und stellt den Maßstabsfaktor für die normierte Funktion dar. Desweiteren wird denselben Firstpunkten eine erwartete konstante (Typ = 0) Horizontalverschiebung (Komponente = H) von 0 mm (Parameter = 0) zugewiesen, um das Wissen auszudrücken, dass keinerlei horizontale Verschiebungen prognostiziert wurden. Prinzipiell können auf diese Weise auch andere analytische Funktionen definiert werden. Es muss nur für jeden Funktionstyp das Wissen über den Funktionsalgorithmus im System prozedural verankert sein. Die derart definierten Funktionen (d.h., alle Parameter einer Eingabezeile) werden ähnlich wie unter Kap. 5.3 angeführt zunächst als Fakten repräsentiert und ins *working memory* des wissensbasierten Systems geladen (Abb. 50).

```
(progn_func (type 1) (parameters -50 1.5 0.8) (comp V) (Stat 100 190) (Point_Id 1) )
(progn_func (type 0) (parameters 0) (comp H) (Stat 100 190) (Point_Id 1) )
```

Abb. 50: Beispiel zweier Fakten zur Repräsentation prognostizierter Zeit-Verschiebungskurven

In weiterer Folge werden sie für eine Vorverarbeitung der primären Ausgangsdaten genutzt, bei der die Abweichungen der tatsächlichen Verschiebungen von den erwarteten Funktionen berechnet und bewertet werden (Bewertungsmodell Seite 87 ff).

Um das Wissen über prognostizierte Verschiebungsvektoren - falls es vorhanden ist - für einzelne diskrete Messpunkte zu repräsentieren, ist wiederum eine Eingabe entsprechender Parameter in die ASCII-Konfigurationsdatei vorgesehen. Abb. 51 zeigt daraus ein Auszug.

Winkel[°]	Länge[mm]	von_Stationierung	bis_Stationierung	PNr
0	25	100	190	1
340	23	100	190	2

Abb. 51: Textauszug aus der Konfigurationsdatei zur Definition prognostizierter Verschiebungsvektoren

Die angegebenen Werte beschreiben, dass für alle Firstpunkte (PNr = 1, Abb. 48) innerhalb des Stationierungsbereiches 100 bis 190 ein senkrecht nach unten (Winkel = 0°) weisender Endverschiebungsvektor der Länge 25 mm prognostiziert wird. Demgegenüber wird für den linken

Kämpferpunkt (PNr = 2, Abb. 48) ein in den Hohlraum nach rechts unten (Winkel = 350° , Zählung im Uhrzeigersinn) weisender Endverschiebungsvektor der Länge 23 mm prognostiziert.

Auf diese Weise kann im Prinzip jedem Messpunkt ein erwarteter Endverschiebungsvektor individuell zugewiesen werden. Die so definierten Vektoren werden wiederum geeignet als Fakten repräsentiert und für eine Vorverarbeitung der primären Ausgangsdaten genutzt, bei der die Richtungsabweichungen der tatsächlichen Verschiebungsvektoren von den prognostizierten Vektoren berechnet und gemäß einem auf Seite 87 ff beschriebenen empirischen Modell bewertet werden.

In ähnlicher Weise kann auch das Wissen weiterer projektspezifischer, prognostizierter Verschiebungsaspekte repräsentiert werden, so auch die eingangs erwähnten Endwerte absoluter oder relativer Verschiebungskomponenten. Für das Anwendungsgebiet von Interesse wären darüber hinaus beispielsweise die Prognosen räumlicher Orientierungen von Verschiebungsvektoren oder von Oberflächensetzungsmulden. Um den Programmieraufwand einzugrenzen, wurden diese Aspekte im Prototyp jedoch nicht implementiert.

Eine grundsätzliche Problematik dieser Vorgehensweise ist, dass das derart eingegebene Wissen redundant vorliegen kann bzw. nicht mehr unkorreliert ist. Beispielsweise beinhalten die für einen Messpunkt definierte Zeit-Setzungs- und Zeit-Horizontalverschiebungskurve gleichsam das Wissen über seinen Verschiebungsvektor in der Vertikalebene, da dieser ja eine Kombination obiger Verschiebungskomponenten darstellt. Daher wäre eine zusätzliche Eingabe des Verschiebungsvektors bereits eine redundante Angabe und könnte zu Widersprüchen führen. Um dieses Problem zu lösen, muss das System die getätigten Eingaben des Benutzers überprüfen. Hierfür dienen Konsistenzregeln, die vor dem eigentlichen, späteren Inferenzprozess geladen und abgearbeitet werden und die vorhandenen Fakten auf die Existenz von Redundanzen bzw. Widersprüchen untersuchen.

Die derart repräsentierten, nunmehr als konsistent angenommenen *Verschiebungsprognosen* müssen den tatsächlich auftretenden Verschiebungen gegenübergestellt werden, d.h., die Abweichungen ermittelt und *bewertet* werden. Da für eine Bewertung im Anwendungsgebiet keine Vorgaben existieren, wird im folgenden ein **empirisches Bewertungsmodell** eingeführt.

Empirisches Bewertungsmodell

Jeder Messung werden Bewertungszahlen zugeordnet, die das Ausmaß (den Grad) der *Auffälligkeit* der Abweichungen dieser Messung von den definierten, prognostizierten Funktionen oder Vektoren entsprechend ihrer Größenordnungen beschreiben. Die Bewertungszahlen werden anhand einer Bewertungsfunktion (Abb. 52) ermittelt. Die Steigung der Bewertungsfunktion variiert mit vom Experten zu wählenden unteren bzw. oberen Grenzwerten der Abweichungen, also jenen positiven oder negativen Abweichungen vom prognostizierten Wert, die er mit +1 bzw. -1 bewerten *will* sowie mit einem Toleranzbereich, innerhalb dessen er alle Abweichungen noch mit 0 bewerten *will*. An die derart definierte beidseits unendliche, stetige Bewertungsfunktion wird eine Skalierung gebunden, die den Bereich zwischen -1 und +1 gleichabständig unterteilt und den einzelnen Abschnitten elf qualitative Bewertungsbegriffe (symbolische Ebene) zuordnet und somit eine Semantik festlegt. Die beiden Grenzwerte können prozentuelle (nicht zulässig für Vektoren und bestimmte Funktionen) oder absolute Abweichungen darstellen.

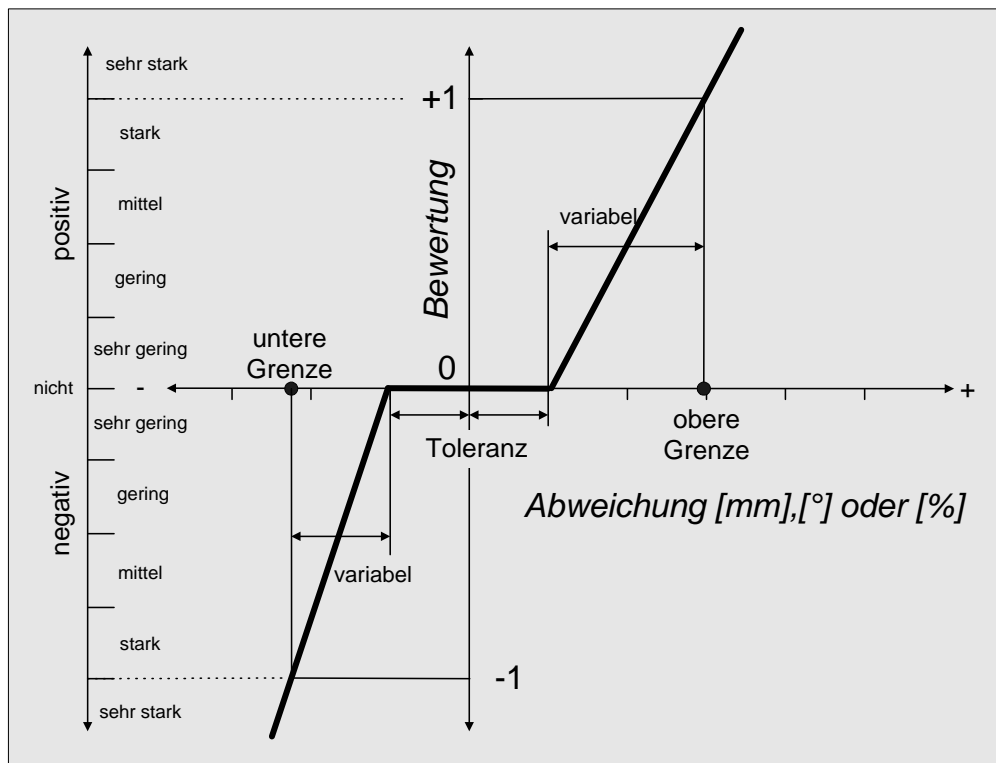


Abb. 52: Bewertungsfunktion und zugeordnete qualitative Bewertungsskala

Sie werden an die entsprechenden Zeilen der in der eingangs beschriebenen (Abb. 49, Abb. 51) ASCII-Konfigurationsdatei definierten prognostizierten Funktionen oder Vektoren angehängt. In textlicher Form sind die getätigten Eingaben noch zu erläutern (Abb. 53). Analog wird die Repräsentation als Fakten in Form einer Erweiterung des Konstrukts aus Abb. 50 durchgeführt.

Typ	Parameter	Komponente	von_Stationierung	bis_Stationierung	PNr	untere Gr.	obere Gr.	Toleranz
1	-50, 1.5, 0.8 V		100	190	1	-30%	100%	2
Erläuterung: Die Prognose stammt von ... Ihre Bewertung basiert auf der Annahme, dass								

Abb. 53: Erweiterte Definitionsdatei für die prognostizierten Zeit-Verschiebungskurven

Gemäß Abb. 53 wird deklariert, dass eine Setzung, deren Wert 30% der prognostizierten Setzung übersteigt, mit -1 und damit als gerade bereits *sehr stark* auffällig bewertet wird, allerdings muss diese Abweichung mehr als -2 mm betragen; ist sie absolut gesehen kleiner, wird sie stets mit 0 und damit als *nicht* auffällig bewertet. Fällt die Setzung geringer aus als in der Prognose, so wird dies ebenso als auffällig betrachtet, erreicht jedoch erst bei einer 100% igen Abweichung, falls also gar keine Setzung stattfindet, die Bewertungszahl $+1$. Grundsätzlich muss sie aber wieder mehr als $+2$ mm betragen, um gerade nicht mehr *nicht auffällig* zu sein.

Liegen prognostizierte Zeit-Verschiebungskurven vor (es handelt sich ja um eine Option), so sind damit implizit die prognostizierten Relativgeschwindigkeiten zeitlich aufeinander folgender diskreter Messungen mitdefiniert. Eine abermalige Erweiterung jeder Zeile der in Abb. 53 ersichtlichen Dateieinträge um zwei zusätzliche Bewertungsgrenzen und eine Toleranz erlaubt eine von jener der absoluten Abweichungen getrennte Bewertung der Relativgeschwindigkeitsabweichungen zweier aufeinander folgender Messungen. Werden die Grenzwerte in Prozentzahlen ausgedrückt, so lässt sich ein Modell realisieren, zufolge dessen gleich große Abweichungen

unterschiedlich stark bewertet werden können. Damit lassen sich beispielsweise kleinere Abweichungen in den ersten Stunden nach der Nullmessung höher bewerten, wodurch bereits frühzeitig auf eine gegenüber der Prognose auffällige Entwicklung hingewiesen werden kann.

Mit dem vorliegenden Bewertungsmodell ist dem Experten einerseits eine Möglichkeit geboten, sein Wissen darüber auszudrücken, in welchem Ausmaß er Abweichungen gegenüber der offiziellen Prognose als auffällig einschätzt, andererseits aber auch eine Vorschrift vorgegeben, wie er dies zu tun hat. Aus Abb. 52 wird ein linearer Verlauf der Bewertungsfunktion sowie eine qualitative Bewertungsskala bestehend aus elf Symbolen (im Grunde sechs, da die weiteren fünf symmetrisch sind) ersichtlich. Die qualitative Skala wird für das Anwendungsgebiet deshalb als brauchbar, da vor allem nicht zu grob, erachtet. Eine weitere Ausdünnung führt zu einem zu starken Verlust qualitativer Unterscheidungsstufen. Eine weitere Verdichtung hingegen würde zu in ihrer Bedeutung immer schwieriger differenzierbaren und textlich sinnvoll zu benennenden Symbolen führen. Eine erweiterte Skalierung in der Art: *extrem gering* → *sehr sehr gering* → *sehr gering* → ... ist in ihren Übergängen wohl nur mehr schwer nachvollziehbar. In der Praxis wird ein Experte wohl weder im Stande noch Willens sein, Abweichungen derart zu bewerten. Letztlich ist die gewählte Skala ein pragmatischer Kompromiß aus diesen Überlegungen. Im Prototyp nicht vorgesehen, aber grundsätzlich denkbar ist natürlich auch eine freie Konfigurierbarkeit dieser Skala. Die Wahl einer linearen Berechnungsfunktion wird aus Gründen der Einfachheit und Verständlichkeit so festgelegt. Abweichungen und Bewertungen sind einander (ausser es werden prozentuelle Bewertungsgrenzen angegeben) dann proportional. Eine Erweiterung des Prototyps könnte auch hier eine freie Konfigurierbarkeit vorsehen.

Auf Basis des Bewertungsmodells werden nun für die tatsächlichen Abweichungen ihre Bewertungszahlen und –symbole ermittelt. Hierbei wird zusätzlich eine zu spezifizierende *empirische Messungenaugigkeit* mitberücksichtigt (Abb. 54).

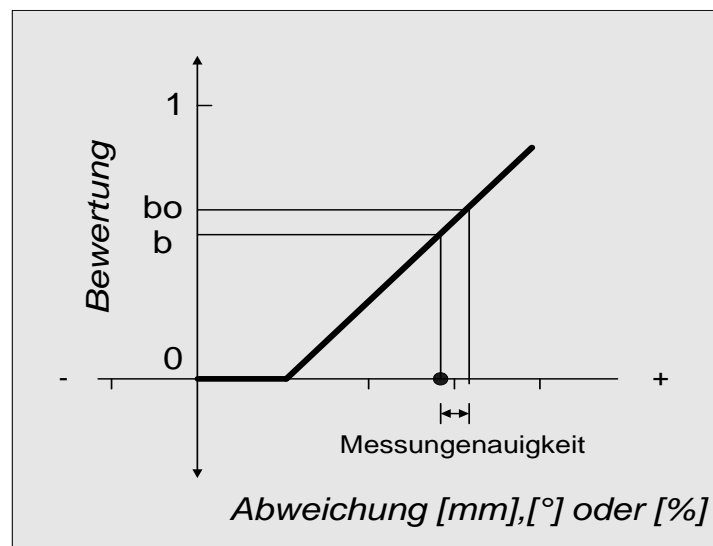


Abb. 54: Auswertung der Bewertungsfunktion unter Berücksichtigung der Messungenaugigkeit

Die ermittelte Abweichung wird um den Betrag der angenommenen Messungenaugigkeit vergrößert, die Bewertungszahl b_0 anstelle von b ermittelt. Nach diesem Schema wird praktisch immer die *worst-case* Bewertung ermittelt, wodurch man in interpretatorischer Hinsicht stets *auf der sicheren Seite* bleibt.

Die Messungenauigkeit ist als globale Variable in [mm] anzugeben, für die Bewertung von Richtungsabweichungen von erwarteten Vektoren wird sie entsprechend der aktuellen Vektorlänge in [°] umgerechnet. Eine individuell jeder Messung zugeordnete Messungenauigkeit (eventuell als Funktion der mittleren Koordinatengenauigkeiten) wäre denkbar und in geodätischem Sinne exakt, ist aber auf Basis des für diese Arbeit verfügbaren Datenmaterials nicht möglich. Aus diesem Grund muss im Prototyp ein möglichst *repräsentativer, empirischer* Wert angegeben werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass auch eine Nullmessung prinzipiell ungenau ist und daher jede zu bewertende Abweichung im Grunde eine Relativabweichung darstellt. Praktisch sinnvoll erscheint daher ein Wert im Bereich weniger Millimeter. Im übertragenen Sinn widerspiegelt seine Größe auch das Vertrauen in die Messungen.

Die Bewertungszahlen und –symbole werden mittels einer Vorverarbeitungsprozedur für jede Messung berechnet und anschließend als Fakten repräsentiert. Hierfür wird in Analogie zur Repräsentation der primären Ausgangsdaten (Kap. 5.3) wieder das Clips-Konstrukt DEFTEMPLATE verwendet. Ein Beispiel mittels Fakten repräsentierter Bewertungen der Absolut-, Relativ- und Vektorrichtungsabweichungen einer Messung zeigt Abb. 55.

```
(progn_ratings (r_Nr 286) (abs_S 1.43 very_high_pos) (abs_H 0.25 little_pos) (abs_V -1.34 very_high_neg)
(rel_S 0.12 very_little_pos) (rel_H 0.00 no_value) (rel_V -0.14 very_little_neg) (vector 0.81 high_pos) )
```

Abb. 55: Faktenrepräsentation der Bewertungszahlen und –symbole einer Messung

Das Erkennen und Melden auffälliger Abweichungen vom prognostizierten Verformungsverhalten wird mittels Regeln gesteuert. Inferenziert werden kann aufgrund der doppelten Repräsentation nun entweder über die qualitativen (symbolische Ebene) oder numerischen Bewertungen. Ersteres ist laufzeiteffizienter, zweiteres ermöglicht eine feinere Auflösung. Sobald eine zu wählende symbolische oder numerische Bewertungsgrenze (Evidenzgrenze) erreicht wird, wird ein entsprechender Fakt dem working memory hinzugefügt. Nach Vorliegen aller derartigen Fakten übernehmen Berichtsregeln die Eintragungen im Analysebericht (Abb. 56).

```
REMARKABLE DEVIATION from ABSOLUTE SETTLEMENT PROGNOSE
DETECTED for a single measurement ! (the settlement is bigger than prognosed)
```

- TM: 209 NR: 1 at: 5.11.2001, 10:00:00 **abs. rating: very high (-1.34) rel. rating: little (-0.31)**
[Explanation](#)

Abb. 56: Ausgabebeispiel für eine auffällige Absolutsetzung

Es lassen sich nun wieder geeignete Regeln definieren, mit denen von auffälligen Einzelmessungen logisch auf die räumliche oder zeitliche Ausdehnung auffälliger Messungen geschlossen werden kann. Um deren Auffälligkeit zu beschreiben, werden aus den Einzelbewertungen bestimmte charakteristische Werte selektiert. Für das Beispiel von gegenüber der Prognose bereits seit längerer Zeit auffälligen Abweichungen der Absolutsetzungen eines Punktes wird beispielsweise die Angabe der ersten und letzten Einzelbewertung und der Bewertung der letzten Relativsetzungsgeschwindigkeit (momentane Tendenz) als sinnvoll erachtet (Abb. 57). Es kann dann auf das Melden jeder einzelnen Messung verzichtet werden.

**REMARKABLE DEVIATION from ABSOLUTE SETTLEMENT PROGNOSE
DETECTED for a series of measurements !** (the settlement is bigger than prognosed)

- TM: 209: NR: 1 from: 5.11.2001, 10:00:00 **abs. rating: very high (-1.34)**
until: 30.11.2001, 10:00:00 **abs. rating: very high (-2.12) rel. rating: high (-0,83)**

[Explanation](#)

Abb. 57: Ausgabebeispiel für eine auffällige Absolutsetzungsentwicklung einer Messsequenz

Diskussion der Problemlösung

Hinsichtlich der gewählten Vorgehensweise sind wieder Eigenschaften, Einschränkungen und mögliche Erweiterungen anzumerken:

- Im Ausgabebericht ist zunächst nicht erkennbar, welche tatsächlichen Größenordnungen die Abweichungen von der Prognose erreichen, wie die Prognose selbst lautet bzw. wie sich die Situation im Detail darstellt. Es wird wieder davon ausgegangen, dass im Falle einer Systemmeldung der Experte eine entsprechende Grafik zur weiteren Beurteilung anfordern wird.
- Wie sich die ausgegebenen Bewertungen errechnen, ist zunächst auch nicht mehr transparent. Mittels eines zusätzlichen links ([Explanation](#), Abb. 56 und 57) können jedoch, falls erwünscht, erklärende Informationen (das zugrundeliegende Bewertungsmodell, wer es erstellt hat, seine textliche Erläuterung, die prognostizierte Zeit-Verschiebungsfunktion, die numerischen Werte der Abweichungen) angefordert werden.
- Es ist offensichtlich, dass das zur Konfiguration des Bewertungsmodells herangezogene Wissen nicht mehr als öffentliches Wissen betrachtet werden kann, da im Anwendungsgebiet keine Bewertungsstandards existieren. Es wird der Begriff *Auffälligkeit* im Unterschied zu Kap. 5.5.1 zwar skaliert, jedoch immer noch scharf definiert und bleibt damit gegenüber einer unscharfen Definition (wie z.B. mit Methoden der Fuzzy-Logik) für den Benutzer noch eher verständlich und nachvollziehbar.
- Es werden außer der Prognose selbst keinerlei sekundäre Daten im Zuge der Inferenz berücksichtigt. Sämtliches Wissen liegt also implizit in den Bewertungen der einzelnen Abweichungen, konkret in der Parametrisierung des Bewertungsmodells, verborgen. Auf welches Wissen sich dieses wiederum stützt, wird nur durch die Faktenrepräsentation des Erläuterungstextes (Abb. 53) transparent, in dem beispielsweise auf sekundäre Daten verwiesen werden kann. Es wird also nicht versucht, bereits jenes Wissen zu repräsentieren und auch anzuwenden, das zur Konfiguration des Bewertungsmodells führt.
- Bewertet wird punktuell der augenblickliche Zustand einer einzelnen Messung, konkret deren Abweichung von der Prognose. In deren Bewertung erfolgt daher keine Berücksichtigung der Bewertungen der vergangenen bzw. zukünftigen (besser: zeitlich späteren, dennoch aber bereits vorliegenden) Abweichungen oder der Bewertungen der Abweichungen räumlich benachbarter Punkte. Das Ergebnis stellt daher auch nur einen von allen anderen Messdaten unabhängigen Zustandsbericht dar. Im Ergebnis tritt keine Unsicherheit auf. Es erfolgt auch weder Repräsentation noch Verarbeitung von Unsicherheit.
- Inferenziert wird (außer es ist eine feine Auflösung der Bewertungen erwünscht) auf symbolischer Ebene, wodurch der Inferenzprozess effizient abläuft.

Auswerteergebnisse hierzu werden in Kapitel 6.2 präsentiert und diskutiert.

5.5.3 Nichtöffentliches, persönliches Fachwissen

In Kapitel 4.3 Seite 55 ff wird erläutert, dass Experten über persönliches Wissen verfügen, mit dessen Hilfe sie auftretende Verschiebungen auch dann beurteilen können, falls es keine offiziellen Vorgaben (Prognosen) gibt. Zwar ist im Allgemeinen nicht zu erwarten, dass für ein Projekt keinerlei Prognosen vorhanden wären; jedoch ist davon auszugehen, dass die Vorhandenen nur die wesentlichsten Aspekte beschreiben und dabei zudem auf Modellannahmen basieren, welche dann gegebenenfalls nicht oder nur unzureichend den tatsächlichen Verhältnissen entsprechen. Es ist daher durchaus auch denkbar, dass die persönlichen Erwartungen von den offiziellen Prognosen abweichen. Das persönliche Wissen kann nun beispielsweise eigenständige Annahmen über *erwartete* Zeit-Verschiebungsfunktionen oder -vektoren umfassen. Ist dies der Fall, so kann dieses Wissen analog zu Kapitel 5.5.2 repräsentiert werden; mit dem Unterschied, dass die Angaben vom System als *persönlich erwartete* getrennt von den zuvor beschriebenen *offiziell prognostizierten* Angaben zu verwalten und verarbeiten sind. Insbesondere in der Ausgabe ist diese Trennung deutlich zu machen. Zur Ermittlung *erwarteter* Zeit-Verschiebungsfunktionen kommen insbesondere empirische Funktionen in Betracht, mit deren Hilfe eine Kurvenanpassung an die tatsächlichen Verformungen ermöglicht wird. Im folgenden wird ein Beispiel einer im Anwendungsgebiet gebräuchlichen empirischen Funktion dargestellt [34]:

$$def(t) = 1 - \left(\frac{1}{p_2 \cdot t + 1} \right)^{\left(\frac{m}{p_1} \right)}$$

p1, p2	empirische Parameter
t	Anzahl der Tage nach dem Ausbruch
m	Mittelwert der Verformungen zwischen 1. und 2. Tag

Die Parameter m, p1 und p2 lassen sich aus dem bereits vorliegenden Datenmaterial, daraus p1 und p2 z.B. durch Ausgleichung der Verschiebungen eines Messpunktes, ermitteln und können dann unter der Annahme homogener Gebirgsverhältnisse für weitere Messpunkte herangezogen werden.

Die weitere Verarbeitung dieses Wissens, insbesondere die punktuelle Bewertung der Abweichungen kann analog zu Kap. 5.5.2 erfolgen.

Das persönliche Wissen erlaubt es dem Experten aber zudem, speziellere Verschiebungsaspekte zu beurteilen. Als ein Beispiel von vielen soll die Beurteilung von Differenzen von Verschiebungskomponenten zweier Messpunkte eines Messquerschnitts betrachtet werden. Hierzu wird in Kap. 2.3.3, Seite 14 angeführt, dass insbesondere aus den Setzungsdifferenzen zwischen First- und Ulmenpunkten Auffälligkeiten erkannt werden können. Dies ist auch dann möglich, wenn keine Erwartungen an die Absolutwerte der Setzungen vorliegen. Das sich ergebende konkrete Problem soll zunächst wieder formuliert werden:

Formulierung des Problems

1. *Es wird grundsätzlich erwartet, dass die auftretenden Verschiebungsdifferenzen zweier Messpunkte einer vorliegenden „Erwartung“ entsprechen. Ist dies nicht der Fall, so ist dies auffällig.*
2. *Das Maß der Auffälligkeit ist vom Ausmaß (von der Größenordnung) der Abweichungen der auftretenden Verschiebungsdifferenzen von den erwarteten Verschiebungsdifferenzen abhängig.*

Entwicklung der Problemlösung

Dieses bereits etwas speziellere Fachwissen lässt sich wieder geeignet anhand der empirischen Bewertung von Abweichungen gegenüber dem erwarteten Verhalten modellieren. Das erwartete Verhalten samt Bewertungsparameter wird ähnlich wie bisher mittels Textdatei (Abb. 58) deklariert und faktenrepräsentiert (Abb. 59).

Typ	Parameter	Komponente	von_Stationierung	bis_Stationierung	PNr	untere Gr.	obere Gr.	Toleranz
0	-50	V	100	190	1 2	-50	99999	2
<i>Begründung: Es ist möglich, dass eine zu große Differenz auf eine zu hohe Belastung der Firste hinweist,...</i>								

Abb. 58: Definition einer erwarteten Zeit-Verschiebungsdifferenzkurve und ihrer Bewertungsparameter

```
(exp_diff_func (type 0) (parameters -50) (comp V) (stat 100 190) (point_Id 1 2) (limits -50 99999) (tol 2)
(text Es ist möglich, dass eine zu große Differenz auf eine zu hohe Belastung der Firste hinweist,...) )
```

Abb. 59: Repräsentation o.a. Zeit-Verschiebungsdifferenzkurve und ihrer Bewertungsparameter als Fakten

Es wird deklariert, dass zwischen First- und linkem Ulmpunkt eine maximale Setzungsdifferenz von -50 mm vom Experten erwartet wird. Abweichungen von dieser Erwartung werden entsprechend den unteren und oberen Abweichungsgrenzen und einer Toleranz bewertet. Bildet sich eine Differenz von -100 mm aus, ist dies sehr stark auffällig. Eine geringere Differenz als die erwarteten -50 mm soll in diesem Fall für den Experten uninteressant sein. Mittels Regeln wird wiederum das Auftreten entsprechend hoch bewerteter und somit als auffällig eingeschätzter Abweichungen erkannt und berichtet. Im Prototyp erfolgt im Gegensatz zu den obigen Beispielen jedoch keine Vorausberechnung und Repräsentation aller Bewertungen als Faktenwissen. Deren Berechnung wird erst während der Laufzeit des Inferenzvorgangs innerhalb der jeweiligen Regel selbst ausgeführt. Als Fakten werden sie in der Folge nur repräsentiert, wenn sie die Bewertungsgrenzen überschreiten. Dies verlangsamt zwar den Inferenzprozess im Falle großer Datenmengen merklich, wurde aber deshalb so konzipiert, da die nötigen Berechnungen über eine Vorverarbeitungsprozedur besonders aufwändig wären und sich das Problem mittels Regeln einfacher und eleganter lösen lässt. Die CLIPS-Syntax einer solchen Regel im Prototyp zeigt Abb. 60.

```
(defrule MAIN::check_remarkable_vertical_displacement_difference
(rule 203.1)
(def_pt (r_Nr ?j1) (stat_Id ?STAT1) (point_Id ?NR1) (date ?Mdate1 ?) (status 1)
(last ?li1) (abs_V ?v1))
(def_pt (r_Nr ?j2) (stat_Id ?STAT1) (point_Id ?NR2) (date ?Mdate1 ?) (status 1)
(last ?li2) (abs_V ?v2))
(not (outlier_def_pt (r_Nr ?j1)))
(not (outlier_def_pt (r_Nr ?j2)))
(exp_diff_func (type ?type) (parameters $?par) (comp V) (stat ?s1&: (<= ?s1 ?STAT1)
?e1&: (>= ?e1 ?STAT1)) (point_Id ?NR1 ?NR2) (limits ?l1 ?l2) (tol ?tol))
=>
(bind ?r (evaluate_rating ?type $?par ?l1 ?l2 ?tol ?v1 ?v2 ?Mdate1))
(if (>= (abs ?r) ?*rating_limit*) then
(assert (rem_vert_displ_diff ?j1 ?j2 ?r)))
)
```

Abb. 60: Regel für das Erkennen auffälliger Setzungsdifferenzen zweier Punkte eines Messquerschnitts

In den Vorbedingungen der Regel wird zunächst nur geprüft, ob entsprechendes Faktenwissen zur Beurteilung von Setzungsdifferenzen überhaupt vorhanden ist und auf zwei Punkte angewendet werden kann. Ist dies der Fall, so wird im Aktionsteil der Regel die zugehörige Bewertungszahl ermittelt. Ist diese größer oder gleich einer Bewertungsgrenze, wird ein entsprechender Fakt generiert. In weiterer Folge erzeugt von diesem Fakt ausgehend eine Berichtsregel eine strukturierte Ausgabe. Logisch kann wiederum mittels weiterer Regeln auf die räumliche oder zeitliche Ausdehnung des Phänomens geschlossen werden (z.B. auf ganze Tunnel- oder Zeitabschnitte, in denen das Phänomen auftritt).

Diskussion der Problemlösung

- Auf Basis geeigneter Faktenrepräsentation eines erwarteten Verschiebungsverhaltens, der Bewertung darauf bezogener Abweichungen und empirischer Regeln können bereits eine ganze Reihe wertvoller automatischer Analysen des Datenbestands vorgenommen werden. Folgende weitere projektspezifische Erwartungen werden von Experten im Anwendungsgebiet häufig artikuliert und böten sinnvolle Erweiterungsmöglichkeiten des Prototyps:
 - *Ab x Tagen nach der Nullmessung (oder nach Durchgang einer bestimmten oder der allerletzten Bauphase) wird erwartet, dass keine signifikanten Verschiebungen mehr auftreten.*
 - *24 Stunden nach der Nullmessung (Erstverformung) wird für die Verschiebungen ein bestimmtes Maß erwartet.*
 - *Für den Verschiebungszuwachs zufolge des Strossenvortriebs wird ein bestimmtes Maß oder auch nur ein bestimmtes Verhältnis gegenüber den Gesamtverschiebungen erwartet.*
- Analog Kap. 5.5.2 werden die Ergebnisse direkt auf Basis punktueller, empirischer Bewertungen von Abweichungen einzelner Messungen, diesmal gegenüber einem *erwarteten* Verhalten, ermittelt. Das wissensbasierte System fungiert als automatisches Berichtssystem über die qualitative und auch quantitative Bewertung aller Verschiebungsauffälligkeiten, die ein bestimmtes Bewertungsmaß erreichen.
- Mit der Menge des im System zu repräsentierenden Wissens über derartige *Erwartungen* steigt die Anzahl der zur Inferenzlaufzeit zu prozessierenden Abweichungen und Bewertungen. Als Fakten repräsentiert werden nunmehr aber nur jene Daten, die eine Bewertungsgrenze übersteigen. Würde man alternativ deren Berechnung für den Gesamtdatenbestand noch vor dem Inferenzprozess durchführen (für jede *Erwartung* wäre dann eine eigene mehr oder weniger komplexe Berechnungsprozedur erforderlich), kann hingegen die Menge der anschließend als Fakten ins working memory zu ladenden Bewertungen enorm ansteigen. Außerdem würde jede Erweiterung der Wissensbasis, d.h. die Repräsentation einer neuen Erwartung, einen erhöhten prozeduralen Implementationsaufwand bedeuten. Es liegt ein grundsätzliches Designproblem vor, in dem Verarbeitungseffizienz gegenüber Erweiterungsfreundlichkeit und Einfachheit der Repräsentation abzuwägen ist.
- Auch eine Bewertung der Differenzsetzungsgeschwindigkeit als ein Indiz dafür, ob die Situation schlimmer zu werden droht, ließe sich nach Erweiterung der Repräsentation aus Abb.58 in den Ausgabebericht aufnehmen.
- Sinngemäß gelten weiters die Anmerkungen von Seite 91.

Für einen anderen Analysefall soll nun im Gegensatz zur bisherigen Vorgehensweise explizit Unsicherheit ins Spiel gebracht werden. Ziel soll sein, auf das Vorliegen einer auffälligen, da wahrscheinlich fehlerhaften Messepoche empirisch zu schließen. Die Auffälligkeit soll anhand eines im Anwendungsgebiet typischen, systematischen Fehlermusters in den primären Ausgangsdaten erkannt werden. Das Muster sei im folgenden Beispiel eine einfache *hakenartige* Struktur im zeitlichen Verlauf der Verschiebungen, deren geodätische Ursache in einer einmalig fehlerhaften Bestimmung der Standpunktskoordinaten angenommen werden soll (Abb. 61). Theoretisch müssten alle Messergebnisse der betroffenen Messepoche dieses Standpunkts als in gleicher Weise systematisch verfälscht in Erscheinung treten. In der Praxis ist dies jedoch aus verschiedenen Gründen nicht immer der Fall. Es ist zu ermitteln, mit welcher Sicherheit Experten aus den einzelnen Messungen auf das Vorliegen dieses Sachverhalts schließen sowie wie von diesen das Ausmaß dieser Auffälligkeit beschrieben wird.

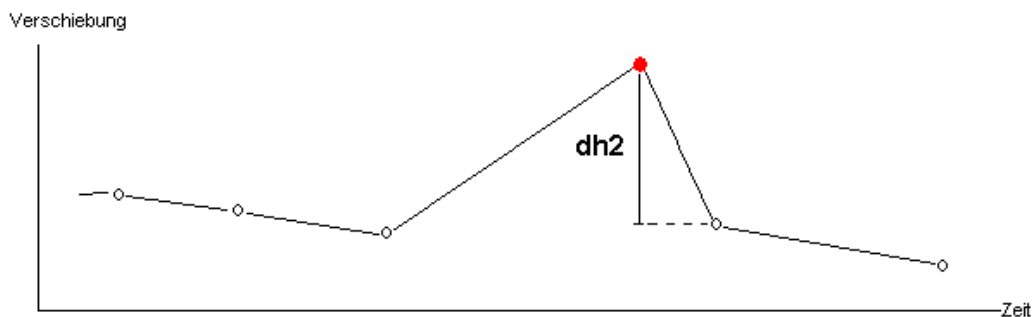


Abb. 61: Hakenartiges Fehlermuster

Ausgangspunkt sei zunächst aber wieder die Formulierung des Problems.

Formulierung des Problems

1. *Es wird grundsätzlich erwartet, dass der zeitliche Verlauf von Verschiebungen bei Vernachlässigung kleinerer Messungenauigkeiten einer glatten Kurve entspricht. Liegt auch nur ein Haken vor, der nicht mehr als Messungenauigkeit erklärt werden kann, so ist dies auffällig und zumindest ein erstes Indiz für das Vorliegen einer fehlerhaften Messepoche.*
2. *Der Grad der Auffälligkeit einer Einzelmessung ist zunächst intuitiv abhängig von der „Relativhöhe“ oder „Ausgeprägtheit“ des Hakens gegenüber den zeitlich benachbarten Messungen vorher und nachher.*
3. *Der Grad (die Stärke) der Auffälligkeit der gesamten Messepoche ist intuitiv das Mittel der Auffälligkeitsgrade aller auffälligen Einzelmessungen. Dies gilt auch dann, wenn nur eine von vielen Messungen das Fehlermuster zeigt, da die Stärke der Auffälligkeit von der Sicherheit des Schlusses begrifflich zu trennen ist. Die Mittelbildung erfolgt nur über jene Messungen, die auffällig sind; unauffällige Messungen derselben Messepoche werden dabei also nicht berücksichtigt.*
4. *Die intuitive Sicherheit des Schlusses ist abhängig von der Anzahl der Messungen, die für die Fehlerhypothese, gegen sie wie auch weder für noch gegen sie sprechen. Zeigen beispielsweise alle von insgesamt zwanzig Messungen diese Erscheinung, so ist die Sicherheit größer als im Falle nur zweier Messungen, von denen alle beide die Haken-*

struktur aufweisen, obwohl die relative Anzahl gleich (100%) ist. Sicherer gegenüber letzterem Fall wird der Schluss aber immer noch sein, falls zwar nicht bei allen, aber immerhin noch bei achtzehn von zwanzig Messungen ein derartiger Haken auftritt. Das bedeutet, dass weder die absolute noch relative Häufigkeit allein entscheidend sind. Man kann daher sagen, die intuitive Sicherheit des Schlusses wächst mit jeder auffälligen Messung und sinkt wiederum mit jeder unauffälligen Messung. Sie sinkt jedoch besonders stark, falls überraschenderweise auch Haken in die andere Richtung auftreten.

5. *Außerdem ist die Sicherheit des Schlusses noch von der „Größengleichheit“ der Haken in den gleichartig auffälligen Messungen abhängig.* Gemeint ist, dass z.B. zehn Messungen, die einen gleich hohen, wenn auch kleinen Haken zeigen, stärker auf den vermuteten systematischen Fehler hinweisen als zehn Messungen, deren Hakenhöhen stark variieren, auch wenn diese insgesamt hoch sind.

Entwicklung der Problemlösung

Zur Repräsentation des beschriebenen großteils intuitiven Wissens im Prototyp ist zunächst der unter Punkt 1 angeführte Begriff der „Ausgeprägtheit“ des Hakens in eine für den Computer verarbeitbare Form zu überführen. Zu diesem Zweck wird dieser Begriff vereinfachend durch die Höhe dh_2 (Abb. 61) der kleineren Flanke modelliert. Der Grad der Auffälligkeit einer solchen Hakenhöhe werde wieder anhand des empirischen Bewertungsmodells (Seite 87) ermittelt, in welches nunmehr dh_2 die Eingangsgröße darstellt. Unter Berücksichtigung des Vorzeichens lassen sich positive wie negative Haken bewerten. Erkennen, Bewerten und Faktenrepräsentation erfolgen regelbasiert zur Laufzeit.

Die Konfigurationsparameter der Bewertungsfunktion (untere und obere Grenzen, Toleranz) seien in diesem Fall globale Variablen des Programms und nicht ihrerseits als Fakten repräsentiert. Sie scheinen deshalb in der Regelsyntax (Abb. 62) nicht mehr auf. Als Ergebnis der Regelbearbeitung liegen zunächst die Faktenrepräsentationen aller Messepochen vor, in denen zumindest eine Einzelmessung das in den Vorbedingungen der Regel spezifizierte primitive Hakenmuster *matcht* und deren Auffälligkeitsbewertung zumindest größer bzw. für die dazu symmetrische Regel (negativer Haken) kleiner als eine bestimmte Schranke ist. Diese Messepochen seien somit zunächst verdächtig und sollen weiter untersucht werden.

```
(defrule MAIN::find_suspicious_epoch_for_error_pattern_3.0
  (rule 3.0)
  (not (cand_error_pattern_3.0 ?Mdate))
  (def_pt (r_Nr ?j) (stat_Id ?STAT) (point_Id ?NR) (date ? ? ?Mdate) (status 1)
    (rel_V ?v1&: (> ?v1 0)))
  (def_pt (r_Nr ?k&: (eq ?k (+ ?j 1))) (stat_Id ?STAT) (point_Id ?NR) (status 1)
    (rel_V ?v2&: (< ?v2 0)))
  =>
  (bind ?r (evaluate_error_rating (min (abs ?v2) (abs ?v1))))
  (if (> ?r ?*error_limit_3.0*) then
    (assert (cand_error_pattern_3.0 ?Mdate)))
  )
```

Abb. 62: Regel für das Erkennen, Bewerten und Faktenrepräsentieren einer verdächtigen Messepoche

Im nächsten Schritt ist das in den Punkten 2 bis 5 beschriebene Wissen anzuwenden. Es müssen die weiteren Messungen der verdächtigen Epochen untersucht und ein Sicherheitsfaktor aus der Anzahl und Gleichheit vorhandener Haken und der Anzahl nicht vorhandener bzw. entgegengesetzt gerichteter Haken ermittelt werden, welcher der intuitiven Einschätzung von Experten möglichst nahe kommt. Am Ende ist der Mittelwert $\overline{dh2}$ aller auffälligen gleichartigen Hakenhöhen zu ermitteln und gemäß Bewertungsmodell zu bewerten. Eine Art ad hoc-Ansatz, um unsicheres Schließen mittels quantitativer Methodik in einem regelbasierten System zu bewerkstelligen bieten **Certainty Factors** [50], im folgenden CF bezeichnet. Ein CF von -1 bedeutet, dass eine Aussage als falsch, ein CF von $+1$, dass die Aussage als wahr angesehen wird. Über eine Aussage mit $CF = 0$ wird weder das eine noch das andere behauptet. Zu finden ist nun der CF der Aussage: *Es liegt ein Fehler in den Standpunktskoordinaten einer Messepoche vor.* Kennzeichen der CF-Methode ist, dass der CF dieser Aussage aus den CFs von Fakten und Regeln nach einem bestimmten Schema errechnet wird. Ein pragmatisches, z.B. im medizinischen Diagnose-Expertensystem MYCIN [50] verwendetes Berechnungsmodell lautet:

Falls ein Fakt A den CF a besitzt und eine Regel R der Form $A \rightarrow B$ (aus Fakt A folgt Fakt B) den CF r besitzt erhalte der hergeleitete Fakt B den CF $b = a \cdot r$ falls a positiv ist und 0 sonst.

Falls also a nicht positiv ist, gibt es keine Überzeugung aus der Regel R den Fakt B herzuleiten und mittels B sollten auch keine weiteren Aussagen abgeleitet werden. Falls nun der Fakt B dennoch aus mehreren Regeln hergeleitet werden kann, wobei sich verschiedene CFs b_1, b_2, \dots, b_n für B ergeben würden, ist wiederum eine Vorschrift anzuwenden, um den endgültigen CF von B zu ermitteln. Eine speziell für regelbasierte Systeme verarbeitbare und auch von MYCIN genutzte Berechnungsfunktion ist:

$$CF(b_1, b_2) = \begin{cases} b_1 + b_2 - b_1 b_2 & \text{falls : } b_1, b_2 \geq 0 \\ b_1 + b_2 + b_1 b_2 & \text{falls : } b_1, b_2 \leq 0 \\ \frac{b_1 + b_2}{1 - \min(|b_1|, |b_2|)} & \text{falls : } (b_1 < 0 \wedge b_2 > 0) \vee (b_1 > 0 \wedge b_2 < 0) \end{cases}$$

Dieses Zwischenergebnis wird wiederum mit $CF(b_3)$ nach demselben Schema verknüpft und so weiter. Das Endergebnis ist unabhängig von der Reihenfolge der Verknüpfungen. Die Wahl dieser Funktion beruht wiederum auf rein intuitiven Überlegungen.

Für das vorliegende Problem müssen nun geeignete CFs für Fakten und Regeln bestimmt werden: Es beschreibe a_1 den CF der Aussage A_1 über einen Messfakt:

Die Messung zeigt einen auffälligen Haken einer definierten Orientierung.

Dieser CF sei $+1$ (wahr), falls die Auffälligkeitsbewertung in dieser Orientierung betragsmäßig größer 0 ist und -1 (falsch), falls diese 0 oder der Haken entgegengesetzt orientiert ist. Wie ersichtlich, ist der CF von der Hakenhöhe selbst unabhängig, der Haken muss nur grundsätzlich auffällig sein. Die Regel $R_1: (A_1 \rightarrow Hyp)$ formuliere den folgenden Zusammenhang:

Aus einem auffälligen Haken kann auf die Hypothese „Standpunktsfehler“ geschlossen werden.

Der CF dieser Regel entspreche einem intuitiven Wert r_1 , der von der Größengleichheit des Hakens gegenüber den anderen abhängig sei. Zur Ermittlung von r_1 diene der Betrag der Differenz der Bewertung der Hakenhöhe vom Mittelwert aller Hakenhöhenbewertungen $|bew_diff|$. Es werden allerdings nur die auffälligen Haken der gerade betrachteten Orientierung verwendet.

Je größer dieser Betrag, desto kleiner der CF obiger Regel und umgekehrt. Um im Intervall $[0, 1]$ zu bleiben, werde der CF wie folgt festgelegt:

$$CF(R1) = r1 = const_1 \cdot f(|bew_diff|) \quad \text{mit: } 0 < const_1 < 1 \text{ und } 0 < f(|bew_diff|) \leq 1$$

Für die Sicherheit des Schlusses bedeutet dies intuitiv eine Herabsetzung, falls ein auffälliger Haken größtmäßig schlecht zu den anderen *passt* und weiters, dass grundsätzlich aus nur einem auffälligen Haken der CF der Hypothese maximal $const_1$ erreichen kann. Ein geeigneter Wert für diese Konstante und eine geeignete Herabsetzungsfunktion $f(|bew_diff|)$ sind wiederum pragmatisch so festzulegen, dass das letztendlich erzielte Ergebnis der Einschätzung eines Experten nahekommt (Kapitel 6.3). Jeder unauffällige wie auch jeder entgegengesetzt auffällige Haken führt definitionsgemäß zunächst zum Ergebnis $CF(Hyp) = 0$, da $a1$ stets negativ (-1) ist.

Den weiteren Aussagen A2 (*Die Messung zeigt keinen auffälligen Haken*) und A3 (*Die Messung zeigt einen auffälligen Haken der entgegengesetzten Orientierung*) werden nach analogem Schema zu A1 ihre jeweiligen CFs ($+1$ oder -1) zugewiesen. Es gelten die weiteren Regeln und CFs:

$$R2: (A2 \rightarrow Hyp) \text{ mit: } CF(R2) = r2 = const_2 \quad \text{mit: } -1 < const_2 < 0$$

$$R3: (A3 \rightarrow Hyp) \text{ mit: } CF(R3) = r3 = const_3 \quad \text{mit: } -1 < const_3 < 0$$

R2 sagt aus, dass eine unauffällige Messung immer konstant gegen die Hypothese spricht, da $const_2$ kleiner 0 ist. R3 besagt, dass ein entgegengesetzter Haken ebenfalls konstant ($const_3$) gegen die Hypothese spricht.

Die Regeln werden jetzt auf alle Messfakten einer verdächtigen Messepoche angewandt und der endgültige CF der Hypothese gemäß obiger Berechnungsfunktion errechnet. Wird das Fehlermuster in mehr als einer Verschiebungskomponente erkannt, führt dies abermals zur Erhöhung des CF. Liegt dieser über einem Grenzwert, wird die Messepoche als fehlerhaft etabliert, d.h. als Fakt repräsentiert und ein Bericht erstellt. In weiterer Folge kann diese Messepoche automatisch oder nach manueller Bestätigung von weiteren Inferenzen ausgeschlossen werden.

Diskussion der Problemlösung

- Ein in der Praxis oftmals auftretendes Problem bei der Beurteilung der Qualität von Messdaten wird mit Hilfe eines Verfahrens unsicheren Schließens nach der Methode der *Certainty Factors* gelöst. Das Verfahren beruht zunächst auf einer Repräsentation des Problems in Form eines Faktenmusters in den Verschiebungsdaten. Die Auffälligkeit eines charakteristischen Merkmals dieses Faktenmusters, im vorliegenden einfachen Beispiel die Höhe der kleineren Hakenflanke, wird bewertet. Liegt ein Verdacht für das Vorliegen des Problems vor, so wird nach einem Verrechnungsschema aus allen zu betrachtenden weiteren Verschiebungsdaten ein endgültiger *Gewissheitsfaktor* für das tatsächliche Vorliegen des Problems regelbasiert ermittelt. Eingangsgrößen in das Verrechnungsschema bilden certainty factors von Fakten und Regeln, die den *Wahrheitswert* der mit ihnen verbundenen Aussagen im Intervall $[-1, +1]$ beschreiben.
- Die wertmäßige Festlegung der einzelnen Regel-CFs sind intuitiv der Problemstellung anzupassen. Der Algorithmus der Verrechnungsfunktion wird intuitiv als adäquat erachtet und festgelegt. Unterschiedliche Experten vertreten hierüber mitunter verschiedene Auffassungen. Sie mögen in unterschiedlichem Maße davon überzeugt sein, dass eine Konklusion aus den Prämissen folgt. Da die Parameter also schwierig festzulegen sind, ist es letztlich eine Frage geschickten *Tunings*, um mit dieser Methode gute Resultate zu erzielen. Die Parameter stellen deshalb im Prototyp konfigurierbare globale Variablen dar.

- In gewissen Fällen kann es jedoch zu Fehlaussagen kommen. Der gewählte einfache Ansatz zieht beispielsweise nicht in Betracht, dass auftretende Verschiebungen die Höhe eines Hakens verkleinern, vergrößern, oder aufheben können. Das Verfahren würde treffsicherer, wenn die Hakenhöhe nicht durch dh_2 (Abb.61) charakterisiert, sondern gegenüber einem erwarteten (interpolierten) Verschiebungsverlauf ermittelt würde. Sind zudem noch andere Effekte wie grobe Messfehler und/oder andere systematische Fehler vorhanden, so können immer noch Fehlaussagen die Folge sein. Mittels weiterer empirischer Regeln ließe sich die Treffsicherheit abermals verbessern, indem man beispielsweise vom Mittel besonders stark abweichende Haken zuvor aussondert und nicht verrechnet. Grundsätzlich muss aber auf die Möglichkeit von Fehlaussagen in der Ausgabe hingewiesen werden. Sie definieren das Verwendungsparadigma der Methode im Prototyp.

Auswerteergebnisse zu den beiden Beispielen dieses Kapitels, insbesondere Aussagen zum Fehlverhalten und im Anwendungsgebiet sinnvollen Parameterwerten für die CF-Methode werden in Kapitel 6.3 präsentiert und diskutiert.

5.5.4 Nichtöffentliches, persönliches Metawissen

Zur Steuerung der Inferenzen können vom Benutzer bestimmte Einstellungen in der Programmkonfiguration des Prototyps vorgenommen werden. Dazu zählen:

Datenselektion

Es wird vom Gesamtdatenbestand im working memory nur über jene primären Ausgangsdaten inferenziert, deren Auswertung augenblicklich erwünscht wird. Die Selektion kann nach zeitlichen und/oder räumlichen Kriterien erfolgen. Hierfür dient eine Selektionsmaske, deren Parameter als Fakten geladen werden. Die Selektion wird anhand entsprechender Vorbedingungen in den Regeln berücksichtigt. Mit dieser Möglichkeit kann insbesondere der nötige Zeitbedarf für ein spezielles Analyseziel reduziert werden.

Regelselektion

Jede Regel kann im Konfigurationsmenu individuell aktiviert oder deaktiviert werden. Die getroffene Regelauswahl kann unter einem entsprechenden Namen als *Regelset* gespeichert werden. Zur Vornahme gezielter Auswertungen entsprechend den unterschiedlichen Analysezielen aus Kapitel 4.4 kann ein bestimmtes Regelset ausgewählt werden. Nur die darin als aktiv spezifizierten Regeln werden vom System im Zuge der Inferenzen berücksichtigt.

Selektion von Prognosen bzw. Erwartungen

Die prognostizierten oder erwarteten Verschiebungsfunktionen und/oder -vektoren samt ihrer Bewertungsparameter werden in jeweils einer Datei definiert. Mit der Definition verschiedener solcher Dateien (Prognose- bzw. Erwartungsets), bestehend aus unterschiedlichen Kurven und Bewertungen, kann den unterschiedlichen Analysezielen (Kapitel 4.4) erneut Rechnung getragen werden. Dies ermöglicht in weiterer Hinsicht auch die Definition individueller, expertenabhängiger Konfigurationen, beispielsweise für den Fall, dass verschiedene Auffassungen vertreten werden.

Steuerung des Ausgabeberichts

Die Reihenfolge der Systemmeldungen im Ausgabedokument kann durch die Angabe eines Prioritätswertes für jede Berichtsregel festgelegt werden. Demnach lassen sich beispielsweise die wichtigen Meldungen vor den weniger wichtigen sortiert anordnen. Innerhalb einer Meldung wird stets in der Reihenfolge Stationierung, Punktnummer, Datum sortiert.

weitere Einstellungen

Nach Vorgabe eines Zeitintervalls kann ein Dauerüberwachungsmodus aktiviert werden. Sämtliche Abläufe, vom Einlesen der Daten bis zur Ausgabe des Berichts werden dann automatisch und periodisch durchgeführt, bis der Prozess vom Benutzer abgebrochen wird. Ergebnis eines jeden Durchlaufs ist ein eigener Bericht.

Weiters kann spezifiziert werden, ob die Auswertungen vom System jeweils nur für die aktuellsten, letzten Messungen vorgenommen werden sollen, um eine ständig wiederkehrende Meldung des gleichen bereits in der Vergangenheit erkannten Sachverhalts im Bericht zu vermeiden.

Für jene Regeln, die auf der Bewertung von Abweichungen basieren, sind Bewertungsgrenzwerte zu definieren. Erst eine Überschreitung dieser Grenzwerte führt zum *Feuern* der Regeln. Werden die Grenzwerte auf Null gesetzt, liefert das System quasi einen Gesamtbericht über alle Bewertungen aller ausgewählten Daten und Regeln.

Die beschriebenen Steuerungsmöglichkeiten sind mit den in Kap. 4.3, Seite 57 erwähnten umfassenden, menschlichen Fähigkeiten nicht wirklich vergleichbar. Sie dienen primär der Beschleunigung der Inferenzen in Bezug auf ein gewünschtes Analyseziel.

5.6 Zusammenfassung

Kapitel 5.1 beschreibt die wesentlichen Merkmale der für die Erstellung des Prototyps verwendeten Software-Entwicklungsumgebung CLIPS und seine Eignung für die Problemstellung. Das Programm unterstützt die Wissensrepräsentationsformalisten Fakten, Regeln, Objekte und Prozeduren. Wissensherleitung basiert auf datengetriebener Vorwärtsverkettung, bei der in einem *working memory* vorhandene oder nicht vorhandene Fakten und/oder Objekte mit den Vorbedingungen von Regeln *gematcht* werden und den Inferenzprozess stimulieren.

Abschnitt 5.2 widmet sich einleitend dem Verwendungsparadigma des Prototyps und erläutert anschließend seine Benutzerschnittstelle, seinen Aufbau und seine Komponenten.

Die Abschnitte 5.3 und 5.4 beschreiben Repräsentationen für die primären (Verschiebungen) und zwei Arten sekundärer Ausgangsdaten (Baufortschritt, Überlagerungshöhen) auf Basis der gewählten Entwicklungsumgebung. Die in einzelnen Dateien vorliegenden Daten werden nach einer Vorverarbeitung als Fakten in der Art eines einfachen *frames* im *working memory* des wissensbasierten Systems abgelegt.

In Kapitel 5.5 werden drei unterschiedliche Vorgehensweisen zur Anwendung des Analysewissens vorgestellt:

Die erste (Abschnitt 5.5.1) wird anhand der Fragestellung: *Kann eine geotechnisch auffällige Geschwindigkeitszunahme der Verschiebungen erklärt werden ?* erläutert. Es wird zunächst anhand einer Regel aus den primären Ausgangsdaten auf das Vorliegen einer messtechnisch signifikanten Geschwindigkeitszunahme geschlossen. Diese wird zunächst projektunabhängig als auffällig betrachtet. Danach wird mit Hilfe einer weiteren Regel, die das Faktenwissen über den Baufortschritt heranzieht, eine Ausgabe in Form eines HTML-Berichts aufgebaut. Innerhalb der Regeln repräsentieren im Wesentlichen Prozeduren das nötige Entscheidungswissen. Deren Ergebnisse sind wiederum von vom Experten vorab festzulegenden empirischen Parametern abhängig, die gewisse Grenzwerte festlegen. Der konstruierte Ausgabebericht informiert über die Situation des Baufortschritts, gibt an, ob die gefundene Geschwindigkeitszunahme damit in Zusammenhang stehen könnte und wie das System zu diesen Schlussfolgerungen kommt. Auf die Unsicherheit des Ergebnisses wird textlich hingewiesen. Mit den konzipierten Regeln verfügt das System über das Wissen, dass im Anwendungsgebiet grundsätzlich ein Zusammenhang zwischen Geschwindigkeitszunahme und Baufortschritt herzustellen ist. Ob in diesem Zusammenhang wirklich die Erklärung für das Problem liegt, muss nicht der Fall sein. Die eingangs gestellte Frage wird nur soweit beantwortet, als dies ohne weiteres Projektwissen möglich ist. Die Antwort ist quasi der Hinweis auf diesen für die Interpretation stets zu beachtenden Zusammenhang. Das Resultat ist vom Benutzer weiter zu interpretieren. Fehlt das Faktenwissen über den Baufortschritt, so lautet im Prototyp die Antwort lakonisch: *Für eine mögliche Erklärung der vorliegenden signifikanten Geschwindigkeitszunahme fehlt das nötige Baufortschrittswissen.*

In der auf Seite 80 in Abb. 44 gezeigten Regelbedingung wird das Faktenmuster *signifikante Geschwindigkeitszunahme* exemplarisch und eher primitiv repräsentiert. Mit dieser Repräsentation wird ausschließlich der Fall einer bereits aus drei Messungen sichtbaren deutlichen Zunahme abgedeckt, also jener Fall, der das früheste Erkennen ermöglicht. Um auch andere Fälle abzudecken, könnten zur bestehenden Regel weitere Vorbedingungen disjunktiv hinzugefügt werden oder – noch besser – im Sinne der Modularität der Regelbasis hierfür eigene Regeln definiert werden.

Die zweite Vorgehensweise (Abschnitte 5.5.2 und 5.5.3) geht zunächst von der Voraussetzung aus, dass sowohl offizielle Prognosen als auch persönliche Erwartungen bzgl. des Normalverhaltens von Verschiebungen vorliegen bzw. gebildet werden können und auf Basis von Funktionen und Vektoren beschreibbar sind. Diese - deren Parameter - sind vom Experten über eine Schnittstelle mitsamt einer Kontextinformation einzugeben und werden als Faktenwissen im System repräsentiert. Zusätzlich wird ein Bewertungsmodell eingeführt, wonach die Abweichungen der auftretenden Verschiebungen vom Normalverhalten quantitativ und qualitativ bewertet werden. Eine empirische Messgenauigkeit wird in den Bewertungen berücksichtigt. Die Parameter des Bewertungsmodells sind wiederum vom Experten festzulegen und werden ebenfalls als Fakten im System repräsentiert. Die Berechnung der Abweichungen und Bewertungen erfolgt aus praktischen Gründen teilweise vor und während des Inferenzprozesses. In Abhängigkeit davon werden entweder alle oder nur entsprechend hohe Bewertungen faktenrepräsentiert. Das Erkennen auffälligen Verschiebungsverhaltens erfolgt regelbasiert. Es wird auf das Vorliegen hoher Bewertungen der Abweichungen geprüft. Die räumliche und zeitliche Ausdehnung eines auffälligen Verhaltens wird ermittelt. Die Ergebnisse werden mittels eigener Regeln sortiert und wiederum berichtet. Globale Bewertungsgrenzen legen fest; ob die Regeln feuern.

Nach diesem Konzept wird versucht, das Wissen eines Experten auf direktem Weg zu nutzen. Auf Redundanzen und Widersprüche im eingegebenen Wissen kann mittels Regeln hingewiesen werden (Seite 87). Sekundärdaten können zur Konsistenzprüfung der Eingabe beitragen (Seite 100). Das System stellt Wissen über das Anwendungsgebiet nur anhand einer Auswahl charakteristischer Verschiebungsfunktionen, konkret deren fest verankerte Prozeduren, zur Verfügung. Deren Parametrisierung ist vom Experten durchzuführen. Im Prinzip ist das Konzept nur in diesem Punkt auf das Anwendungsgebiet Tunnelbau zugeschnitten. Je mehr ein Experte darüber weiß, welche Verschiebungen zu erwarten sind, umso mehr kann das System ihn bei der raschen Suche nach Auffälligkeiten unterstützen und umgekehrt. Da dieses Wissen im Verlauf eines Projekts wächst und veränderlich ist, ist von einem entsprechenden Aufwand für den laufenden Betrieb des Systems auszugehen. Fehlerhafte Ergebnisse können eigentlich auch nur fehlerhafte Eingaben reflektieren.

Die dritte Vorgehensweise (Abschnitt 5.5.3, Seite 95 ff) beruht auf einem Verfahren unsicheren Schließens nach der Methode der Certainty Factors. Sie wird im beschriebenen Beispiel zum Bestätigen eines Verdachts auf das Vorliegen eines bestimmten Fehlers in den primären Ausgangsdaten (fehlerhafte Messepoche) genutzt. Ein einfaches Faktenmuster im zeitlichen Verlauf der Verschiebungen eines Messpunkts dient zunächst der Beschreibung der Art der Auffälligkeit. Wird dieses Muster zumindest einmal gematcht, wird ein Verdachtsfakt für die zugehörige Messepoche generiert. In weiterer Folge werden sämtliche Messungen der Epoche näher untersucht. Jeder Messung wird ein certainty factor CF im Intervall $[-1 +1]$ zugeordnet, der den Wahrheitswert der Aussage: *Die Messung zeigt die Auffälligkeit* angibt. Ein CF von -1 bedeutet, die Aussage wird als falsch gesehen, ein CF von $+1$, die Aussage wird als wahr betrachtet. Ein CF von 0 sagt aus, dass weder das eine noch das andere behauptet werden kann. Es wird nun allgemein behauptet, dass aus dem Vorliegen einer Messung (auffällig oder unauffällig) auf das Vorliegen des Fehlers in der Messepoche geschlossen werden kann. Dieser Zusammenhang wird in Form mehrerer Regeln dargestellt, denen ihrerseits CFs intuitiv zugeordnet werden. Nach einem Verrechnungsschema wird aus allen vorliegenden CFs der CF der Hypothese: *Die Messepoche ist fehlerhaft* ermittelt. Übersteigt dieser einen Grenzwert, kann die Messepoche von weiteren Inferenzen gemäß der ersten oder zweiten Vorgehensweise automatisch oder nach manueller Bestätigung exkludiert werden.

Alle drei vorgestellten Vorgehensweisen liefern als Endergebnis einen Bericht. Dieser wird aus Berichtsregeln aufgebaut, in welchen quasi die Erklärungskompetenz des Systems liegt. Links in den Berichten führen zu einem Hauptdokument, in dem weitere allgemeine Angaben und Erklärungen zu finden sind.

Die in Abschnitt 5.5.4 beschriebenen Steuerungsmöglichkeiten der Analysen im Prototyp (Selektion von Verschiebungsdaten, Zusammenstellung von Regeln zu Regelsets, Selektion eines Regelsets, Zusammenstellung von Prognosen bzw. Erwartungen zu sets, Selektion eines solchen Prognose bzw. Erwartungsets, Sortierung der Ausgaben, Überwachungs-modus) repräsentieren in begrenztem Umfang Aspekte des Metawissens. Im Wesentlichen sind sie für die Vornahme zielorientierter Analysen hilfreich.

Im nun folgenden Kapitel 6 werden konkrete Fallbeispiele unter Anwendung der beschriebenen Methoden analysiert und die erzielten Ergebnisse diskutiert.

6. Auswertbeispiele, Test des Prototyps

Anhand konkreter Falldaten werden nachfolgend die drei in Kapitel 5 beschriebenen und im wissensbasierten Prototyp implementierten Vorgehensweisen getestet. Für die einzelnen Tests werden sowohl Daten eines tatsächlichen Tunnelprojekts als auch simulierte Daten herangezogen. Ziel der Tests ist die Beantwortung folgender Fragen:

- *Wie rasch liegen die Ergebnisse vor ? Wovon hängt die Inferenzlaufzeit ab ?*

Zur Ermittlung der Laufzeitperformanz werden Datenmengen und die wichtigsten laufzeitbestimmenden Eingabeparameter variiert.

- *Wie zuverlässig sind die Ergebnisse ? Wovon hängt die Zuverlässigkeit ab ?*

Es wird die Zuverlässigkeit anhand der theoretisch möglichen Fehlansagen und deren Ursachen beurteilt. Die Qualität der Erklärung der Ergebnisse - ob diese also vom Benutzer nachvollzogen werden können - wird aus den Ausgabebeispielen ersichtlich.

Am Ende der Tests wird jeweils auf das Verwendungsziel der Vorgehensweisen, also wofür sie, in der vorliegenden, prototypischen Form, gedacht und geeignet sind, hingewiesen.

6.1 Erkennen einer auffälligen Geschwindigkeitszunahme und ihrer Relation zum Baufortschritt

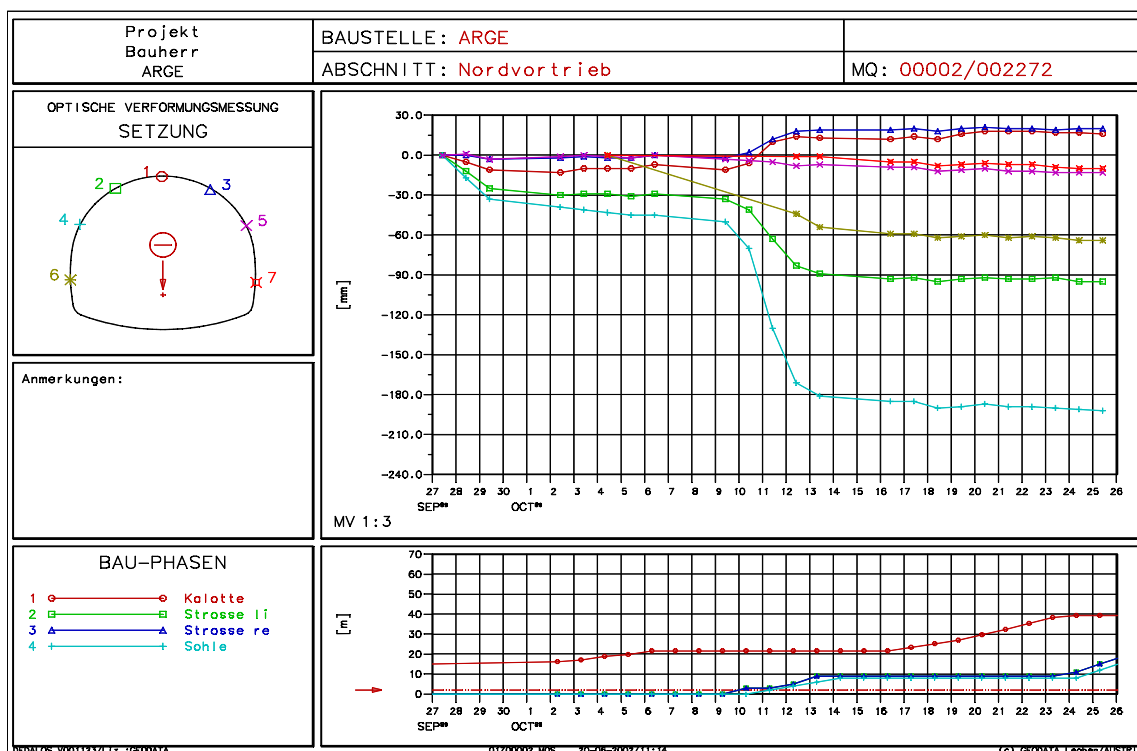


Abb. 63: Diagrammdarstellung der Zeit-Setzungsentwicklung und des Baufortschritts

Mittels der in Kapitel 5.5.1, Abb. 44 und 45 konzipierten Regeln wird eine Zunahme von Setzungsgeschwindigkeiten aufgedeckt und ein möglicher Zusammenhang mit dem Baufortschritt hergeleitet. Ein Experte wird für diese Aufgabe in aller Regel eine Visualisierung der Daten in Diagrammform vornehmen. Abb. 63 zeigt den zeitlichen Verlauf der Setzungen aller Punkte eines Messquerschnitts gemeinsam mit dem Baufortschritt der einzelnen Bauphasen während eines Beobachtungszeitraums von einem Monat. Dargestellt sind darin die - bis auf wenige Unterbrechungen - einmal täglich ermittelten Messergebnisse eines realen Projekts.

Im Prototyp wurde global spezifiziert, dass ab einer Entfernung von 15m zwischen Messpunkt und Ortsbrust zum Zeitpunkt des Auftretens einer plötzlichen Zunahme einer Setzungsgeschwindigkeit das Ereignis nicht mehr auf Vortriebsaktivitäten zurückgeführt werden kann. Es wird damit der maximale räumliche Einflussbereich dieser Aktivitäten festgelegt. Liegen die letzten Baufortschrittsdaten länger als zwei Tage hinter dem Ereignis zurück, so soll auf die geringe Aktualität dieser Daten hingewiesen werden. Der Prototyp kommt zu folgendem Ergebnis (Abb. 64):

REMARKABLE INCREASE of SETTLEMENT VELOCITY ASSUMED !

PLEASE NOTE: The detection is based on a rather primitive algorithm and therefore only delivers possible candidates – manual confirmation is suggested !! use upper link for more details

- TM: 2 NR: 1 measured at: 29.09.1989,10:00:00 exact station: **2.130**

related excavation data:

Kalotte was last measured at: 26.09.1989,7:00:00 station: **15.00**
 -> increase **could** be caused by Kalotte because Kalotte is only **12.9** meters ahead
 but Kalotte was last measured **3.1** days before increase [time-near excavation
 data is missing]

- TM: 2 NR: 2 measured at: 29.09.1989,10:00:00 exact station: **1.914**

related excavation data:

Kalotte was last measured at: 26.09.1989,7:00:00 station: **15.00**
 -> increase **could** be caused by Kalotte because Kalotte is only **13.1** meters ahead
 but Kalotte was last measured **3.1** days before increase [time-near excavation
 data is missing]

- TM: 2 NR: 2 measured at: 10.10.1989,10:00:00 exact station: **1.917**

related excavation data:

Strosse_re was last measured at: 10.10.1989,7:00:00 station: **3.00**
 -> increase **could** be caused by Strosse_re because Strosse_re is only **1.1** meters ahead

Strosse_li was last measured at: 10.10.1989,7:00:00 station: **3.00**
 -> increase **could** be caused by Strosse_li because Strosse_li is only **1.1** meters ahead

Kalotte was last measured at: 10.10.1989,7:00:00 station: **21.60**
 -> increase **can not** be caused by Kalotte because Kalotte is already too far ahead

- TM: 2 NR: 2 measured at: 11.10.1989,10:00:00 exact station: **1.910**

related excavation data:

Sohle was last measured at: 11.10.1989,7:00:00 station: **2.00**
 -> increase **could** be caused by Sohle because Sohle is only **0.1** meters ahead

Strosse_re was last measured at: 11.10.1989,7:00:00 station: **3.00**
 -> increase **could** be caused by Strosse_re because Strosse_re is only **1.1** meters ahead

<p>Strosse_li was last measured at: 11.10.1989,7:00:00 station: 3.00 -> increase could be caused by Strosse_li because Strosse_li is only 1.1 meters ahead</p> <p>Kalotte was last measured at: 11.10.1989,7:00:00 station: 21.60 -> increase can not be caused by Kalotte because Kalotte is already too far ahead</p>
<p>● TM: 2 NR: 4 measured at: 10.10.1989,10:00:00 exact station: 1.945</p> <p>related excavation data:</p> <p>Strosse_re was last measured at: 10.10.1989,7:00:00 station: 3.00 -> increase could be caused by Strosse_re because Strosse_re is only 1.1 meters ahead</p> <p>Strosse_li was last measured at: 10.10.1989,7:00:00 station: 3.00 -> increase could be caused by Strosse_li because Strosse_li is only 1.1 meters ahead</p> <p>Kalotte was last measured at: 10.10.1989,7:00:00 station: 21.60 -> increase can not be caused by Kalotte because Kalotte is already too far ahead</p>
<p>● TM: 2 NR: 4 measured at: 11.10.1989,10:00:00 exact station: 1.941</p> <p>related excavation data:</p> <p>Sohle was last measured at: 11.10.1989,7:00:00 station: 2.00 -> increase could be caused by Sohle because Sohle is only 0.1 meters ahead</p> <p>Strosse_re was last measured at: 11.10.1989,7:00:00 station: 3.00 -> increase could be caused by Strosse_re because Strosse_re is only 1.1 meters ahead</p> <p>Strosse_li was last measured at: 11.10.1989,7:00:00 station: 3.00 -> increase could be caused by Strosse_li because Strosse_li is only 1.1 meters ahead</p> <p>Kalotte was last measured at: 11.10.1989,7:00:00 station: 21.60 -> increase can not be caused by Kalotte because Kalotte is already too far ahead</p>
<p>● TM: 2 NR: 6 measured at: 13.10.1989,10:00:00 exact station: 2.054</p> <p>related excavation data:</p> <p>Sohle was last measured at: 13.10.1989,7:00:00 station: 6.00 -> increase could be caused by Sohle because Sohle is only 3.9 meters ahead</p> <p>Strosse_re was last measured at: 13.10.1989,7:00:00 station: 9.00 -> increase could be caused by Strosse_re because Strosse_re is only 6.9 meters ahead</p> <p>Strosse_li was last measured at: 13.10.1989,7:00:00 station: 9.00 -> increase could be caused by Strosse_li because Strosse_li is only 6.9 meters ahead</p> <p>Kalotte was last measured at: 13.10.1989,7:00:00 station: 21.60 -> increase can not be caused by Kalotte because Kalotte is already too far ahead</p>
<p style="text-align: center;">The system detected 7 remarkable incidents</p>

Abb. 64: Systembericht des Prototyps

Erläuterung des Systemberichts

Für die Messpunkte 1 und 2 wird für den 29.9. eine Geschwindigkeitszunahme konstatiert. Bis zu diesem Zeitpunkt wurde lediglich die Kalotte vorgetrieben. Ihre Ortsbrust liegt noch innerhalb des Einflussbereiches, der Vortrieb könnte demnach das Ereignis verursacht haben. Die Aktualität der verfügbaren Ortsbruststation ist jedoch eher gering, da der letzte Erfassungszeitpunkt bereits mehr

als zwei Tage (3,1 Tage) zurückliegt. Am 10.10. tritt das Ereignis bei den Punkten 2 und 4 auf. Der Kalottenvortrieb ist bereits zu weit entfernt (ausserhalb des Einflussbereichs) und kommt als Ursache nicht mehr in Frage. Jedoch befinden sich zwei kürzlich begonnene Strossenvortriebe in unmittelbarer Nähe und werden daher jeweils als mögliche Ursachen genannt. Am nächsten Tag (11.10.) wiederholt sich das Ereignis für die beiden Punkte 2 und 4. Diesmal kommt der gerade begonnene Sohlvortrieb als weitere mögliche Ursache zusätzlich in Betracht. Am 13.10. erfährt Punkt 6 eine Geschwindigkeitszunahme. Wiederum können alle Vortriebe mit Ausnahme des Kalottenvortriebs dafür verantwortlich sein.

Insgesamt zeigt sich für diesen Messquerschnitt das typische Bild, dass alle auftretenden Ereignisse sehr wahrscheinlich schon allein durch den Baufortschritt erklärbar sind, was vom Prototyp auch durchwegs erkannt wird. Andere offensichtlich vorhandene Auffälligkeiten (Hebungen der Punkte 1 und 3, generell stärkere Setzungen der Punkte der linken Tunnelwand) sind nicht Gegenstand der Analyse und außer Acht zu lassen. Ein geübter Betrachter wird feststellen, dass das Ereignis bei Punkt 6 mit großer Wahrscheinlichkeit schon ein paar Tage früher eingetreten ist, aufgrund fehlender Messungen jedoch erst am 13.10. nachzuweisen war. Würde auch an diesem Tag die Messung fehlen, wäre das Ereignis nicht mehr feststellbar.

Es müssen, sollen die beiden Regeln sinnvolle Resultate liefern, mehrere Voraussetzungen erfüllt sein. Diese werden in der abrufbaren Kontext-Information zum Ergebnis angegeben (HTML-link, Abb. 64) und sind im Wesentlichen in Kapitel 5.5.1 auf Seite 83 erläutert.

Laufzeitperformanz des Prototyps

Zur Auswertung des gewählten Beispiels (2 Regeln, 141 Messfakten, 72 Baufortschrittsfakten) beträgt die Inferenzlaufzeit (für einen PC 1300 MHz, 512 MB, MS-Windows 2000) weniger als eine Sekunde. Weitere Testergebnisse zum Laufzeitverhalten zeigt Tabelle 3. Darin angegeben sind die Inferenzlaufzeit (**hh:mm:ss**), die Anzahl der Regelfeuerungen der ersten der beiden Regeln **R1** (= Anzahl der gefundenen Geschwindigkeitszunahmen) sowie die Anzahl der Regelfeuerungen der zweiten Regel **R2** (= Anzahl der gemeldeten Zusammenhänge mit dem Baufortschritt). Es wurde über tatsächliche Messdaten eines Projekts inferenziert, wobei folgende durchschnittliche Projektrandbedingungen vorliegen: einmal tägliche Messung jedes Punktes über einen Zeitraum von bis zu zwei Monaten, sieben Punkte pro Messquerschnitt, ein bis dreimal tägliche Erfassung von vier Bauphasen. Die Datenmengen (Messfakten **MF**, Baufortschrittsfakten **BF**) entsprechen einer bestimmten Zeit **T** in Monaten, die seit dem Beginn des Projekts vergangen ist.

Anzahl der Messfakten MF / Anzahl der Baufortschrittsfakten BF / Monate seit Projektbeginn T							
MF / BF T	107 / 13 0,5	353 / 77 1	1143 / 201 2	1637 / 301 3	2110 / 401 4	3120 / 573 5	4066 / 1049 6
hh:mm:ss	00:00:00	00:00:01	00:00:21	00:00:59	00:01:32	00:33:02	04:01:45
R1	10	24	39	43	44	62	80
R2	16	72	132	148	152	224	296

Tabelle 3: Laufzeitperformanz des Prototyps

Die tabellierte Zeitangaben sind nicht von allgemeiner Gültigkeit, da die Inferenzlaufzeit nicht ausschließlich von der Datenmenge, den Projektrandbedingungen und der Anzahl der Regelfeuerungen bestimmt wird. Mit entscheidend ist auch, wann und wo eine Auffälligkeit vorliegt. Deutlich wird die rasante Zunahme der Inferenzlaufzeit ab dem 4. Projektmonat.

Wie ersichtlich wird die Auswertung der Daten des gewählten Projekts hinsichtlich der Laufzeit bereits problematisch, wenn der in einem Guss zu analysierende Projektzeitraum (Datenbestand) 5 Monate beträgt. Für die Auswertung längerer Zeiträume und damit größerer Datenmengen ist daher eine Aufteilung in mehrere sequentiell ablaufende Inferenzschritte (z.B. jeweils für die Daten eines Monats) sinnvoll. Wird der Prototyp so konfiguriert, dass er automatisch nur die aktuellsten Messungen und zwar unmittelbar nach deren Vorliegen auswertet, so spielt die Laufzeitproblematik keine Rolle mehr. Sie ist eigentlich nur dann von Interesse, wenn größere Datenmengen nachträglich analysiert werden sollen.

Qualität der Ergebnisse, Fehlaussagen

Die Anwendung der beiden Regeln ist an bestimmte Voraussetzungen (Seite 83) geknüpft, deren Erfülltsein vom Prototyp selbst nicht überprüft wird. Dies ist vom Benutzer zu entscheiden. Es kann daher prinzipiell zu mehreren Arten von Fehlern (Modell- und Benutzerfehler) kommen:

1. Ein in der Realität vorhandenes Ereignis wird nicht erkannt.

Dieser Fall kann auftreten, falls

- aufgrund von erkannten Messfehlern über die entsprechenden Messfakten nicht inferenziert wird (obwohl ein Experte dies unter Umständen dennoch könnte),
- nicht erkannte Messfehler das Nicht-Vorhandensein des Ereignisses vortäuschen (ein Messfehler verhindert quasi die Sichtbarkeit des Ereignisses für das System, es liegt eine *Fehlermaskierung* vor),
- aufgrund einzelner fehlender Messungen das Ereignis nicht direkt sichtbar ist (obwohl ein Experte unter Umständen auf dieses schließen würde – Abb. 63, Messpunkt 6, falls die Messung vom 13.10. fehlen würde),
- jener empirische Toleranzwert, ab dem das Ereignis vom System als messtechnisch signifikant beurteilt wird, zu groß gewählt wird.

2. Ein in der Realität vorhandenes Ereignis wird *zu spät* erkannt.

Dieser Fall tritt streng genommen immer auf, da auf Basis diskreter Messungen analysiert wird und der exakte Zeitpunkt des Ereignisses nicht rekonstruierbar ist. Der Fall wird im Anwendungsgebiet aber dann unangenehm, falls

- Messungen über einen *zu langen* Zeitraum, in dem das Ereignis wohl tatsächlich stattfand, fehlen (Abb. 63, Punkt 6 vom 5.10. bis 11.10.). Es wird das Ereignis erst am 13.10. erkannt und auch die Bestimmung der Ortsbrustentfernung der Bauphasen für diesen *zu späten* Zeitpunkt vorgenommen.

3. Ein in der Realität nicht vorhandenes Ereignis wird zu Unrecht gemeldet.

Dieser Fall kann auftreten, falls

- nicht erkannte Messfehler das Ereignis vortäuschen, wobei zu beachten ist, dass ein solches Fehlergebnis auch von Experten oftmals erst nach Vorliegen weiterer Daten korrigiert werden kann und daher für Letztmessungen nicht unbedingt falsch ist,
- jener Toleranzwert, ab dem das Ereignis als messtechnisch signifikant beurteilt wird, zu klein gewählt wird (hier ist der Übergang zum vorigen Fall oft fließend).

4. Ein Bauphasenzusammenhang wird falsch interpretiert.

Dieser Fall kann auftreten, falls

- der eingegebene, als möglich erachtete Einflussbereich einer Vortriebsaktivität zu groß gewählt wird. Für ein erkanntes Ereignis wird dann fälschlicherweise eine Bauphase als mögliche Ursache genannt. Es handelt sich allerdings nicht um ein echtes Fehlergebnis, da ja stets nur von einer möglichen Ursache gesprochen wird,
- der eingegebene, als möglich erachtete Einflussbereich einer Vortriebsaktivität zu klein gewählt wird. Für ein erkanntes Ereignis wird dann fälschlicherweise eine Bauphase als mögliche Ursache ausgeschlossen,
- Baufortschrittsdaten lückenhaft oder fehlerhaft sind.

Die Zuverlässigkeit der Ergebnisse ist wie erkennbar von der Qualität der Messdaten (Genauigkeit, Vollständigkeit) stark abhängig, da über diese mehr oder weniger vorbehaltlos inferenziert wird. Es wird nur unterstellt, dass bestimmte, ausreichend deutlich in Erscheinung tretende Messfehler erkannt und vorab exkludiert werden können. Fehlergebnisse werden jedoch auch durch eine unkorrekte Festlegung der Eingangsgrößen (z.B. des Toleranzwerts, des Einflussbereichs) bewirkt. Auf all diese Abhängigkeiten und Möglichkeiten wird im Prototyp hingewiesen. Die Kontrolle der Systemergebnisse nach Auswertung des Gesamtdatenbestands des ausgewählten Projekts ergab vereinzelt Fehler laut Punkt 3 obiger Liste. Fehlerhafte Messungen wurden, da sie vom Prototyp nicht als solche erkannt wurden, für signifikante Geschwindigkeitszunahmen gehalten.

Verwendungsziel der Vorgehensweise

In der vorliegenden Form sind die beiden Regeln dazu geeignet, die jeweils aktuellsten Messungen in einem Projekt auf Geschwindigkeitszunahmen hin laufend zu überwachen. Da ein solches Ereignis aus einer Sequenz von nur drei Folgemessungen ermittelt wird, muss es in dieser Sequenz auch sichtbar sein. Demzufolge eignen sich die Regeln bevorzugt für Projekte, in denen wie bisher typisch einmal täglich gemessen wird und damit das Ereignis deutlich in Erscheinung treten kann. Es wird dann zum frühest möglichen Zeitpunkt erkannt.

6.2 Analysen auf Basis von Prognosen und Erwartungen

Anhand der in den Kapiteln 5.5.2 und 5.5.3 erläuterten Vorgehensweise werden offizielle Verschiebungsprognosen oder auch persönliche Verschiebungserwartungen den tatsächlichen Verschiebungen gegenübergestellt. Im folgenden Beispiel erfolgt dies für Setzungsdifferenzen zweier Punkte eines definierten Messquerschnitts. Es wird simuliert, dass ein Experte eine gleiche Setzungsentwicklung für die beiden Kalottenfußpunkte 4 und 5 im Messquerschnitt 2 erwartet, d.h., die Differenzen der zu gleichen Zeiten gemessenen Setzungen dieser Punkte hinreichend klein und damit unauffällig sind. Dieses Wissen wird wie folgt deklariert (Abb. 65):

Typ	Parameter	Komponente	von_Stationierung	bis_Stationierung	PNr	untere Gr.	obere Gr.	Toleranz
0	0	V	2	2	4 5	-40	40	5

Hinweis: Große Setzungsdifferenzen weisen auf eine asymmetrische Belastung der Kalottenfüße hin. Es sollten in diesem Fall folgende Maßnahmen ergriffen werden:...

Abb. 65: Definition erwarteter Setzungsdifferenzen und ihrer Bewertungsparameter

Übersteigt die Setzungsdifferenz absolut gesehen 40 mm wird dies als bereits sehr stark auffällig bewertet. Ist sie kleiner als 5 mm, so wird sie generell als unauffällig klassifiziert. Die empirische Messungenauigkeit, zufolge der jede Differenz vom System künstlich verschlechtert wird, um stets *auf der sicheren Seite* zu bewerten, wird mit 2 mm angenommen. D.h., eine Differenz von 3 mm wird aus Sicherheitsgründen gerade noch als sehr gering auffällig bewertet. Untersucht wird zunächst wieder der Messquerschnitt des vorigen Beispiels (Abb.63). Die zu analysierenden Setzungsdifferenzen der betrachteten zwei Punkte seien in einem eigenen Diagramm dargestellt (Ab. 66).

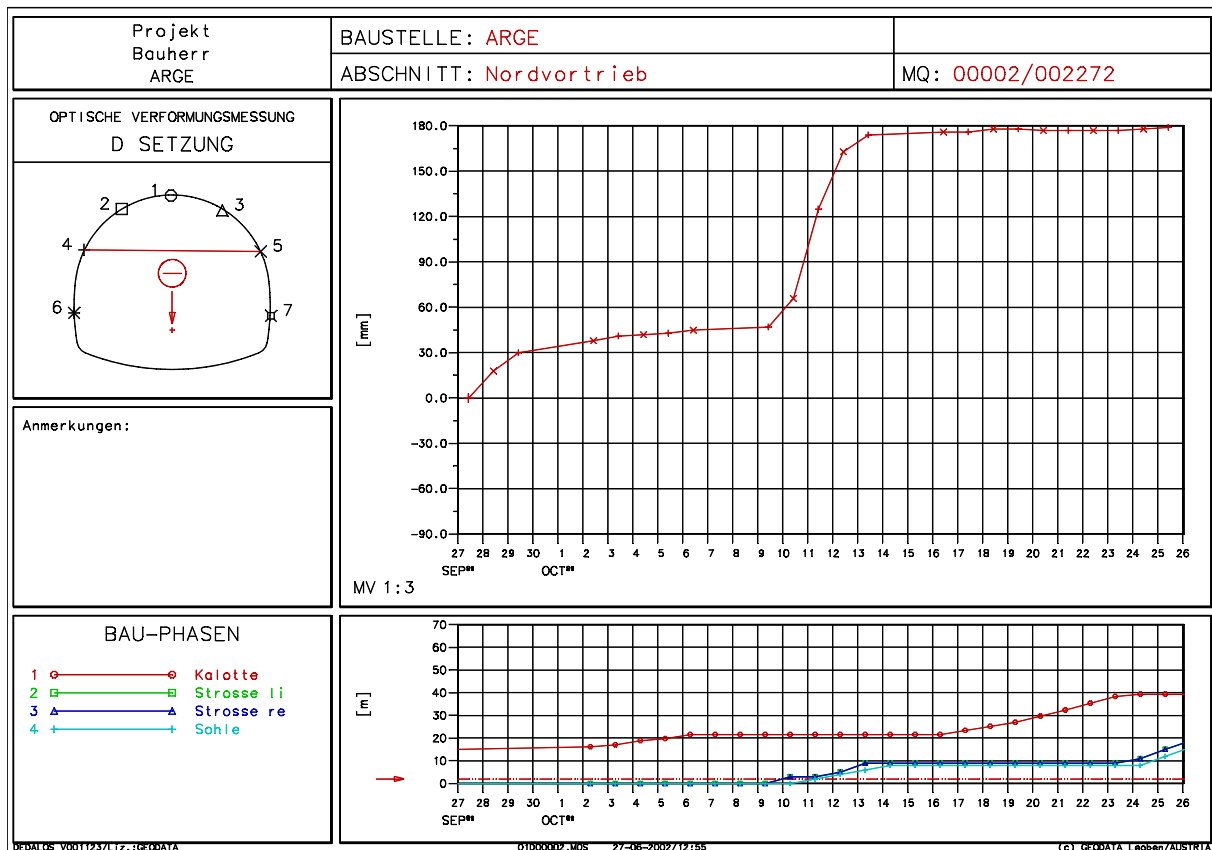


Abb. 66: Diagrammdarstellung der Setzungsdifferenzen der Kalottenfußpunkte und des Baufortschritts

Der Benutzer wünscht, bereits ab einer stark auffälligen Differenz, also ab einer Bewertungszahl $\geq 0,75$ bzw. $\leq -0,75$) informiert zu werden. Dies entspricht einer positiven oder negativen Setzungsdifferenz von gerade 30 mm. Abb. 67 zeigt einen Ausschnitt des Ergebnisberichts des Prototyps. Er gibt an, dass ab dem 29.9. die Differenzen stark auffällig und ab dem 3.10. bereits sehr stark auffällig sind. Die auffälligen Messungen werden der Reihe nach aufgelistet (auf eine mögliche Aggregation wurde verzichtet), ihre individuellen Bewertungen angeführt. Am Ende der Liste findet sich der textliche Hinweis, welche geotechnische Bedeutung das Ergebnis hat sowie ein link auf die zugrundeliegenden Bewertungsparameter.

Der Messquerschnitt 2 zeigt bzgl. der Setzungen der betrachteten Messpunkte 4 und 5 ein (nicht erwartetes) stark asymmetrisches Verschiebungsbild.

REPORT	Project: TEST																				
created : Thu Jun 27, 2002 13:23:10																					
applied rule set: diff_settlement_check.rst	(nr of used rules: 2)																				
used fact file: nordvortrieb_def.fct																					
specified rating limit: ± 0.75 [high]																					
<u>REMARKABLE DEVIATION from EXPECTED VERTICAL DISPLACEMENT DIFFERENCE found !</u>																					
use upper link for more details																					
<ul style="list-style-type: none"> • In section at TM 2 point 4 shows a bigger settlement than point 5. <table border="0" style="margin-left: 20px;"> <tr> <td style="padding-right: 10px;">at: 29.09.1989,10:00:00</td> <td>the difference is rated to be high_neg [-0.77]</td> </tr> <tr> <td>at: 02.10.1989,10:00:00</td> <td>the difference is rated to be high_neg [-0.99]</td> </tr> <tr> <td>at: 03.10.1989,10:00:00</td> <td>the difference is rated to be very_high_neg [-1.08]</td> </tr> <tr> <td>at: 04.10.1989,10:00:00</td> <td>the difference is rated to be very_high_neg [-1.11]</td> </tr> <tr> <td>at: 05.10.1989,10:00:00</td> <td>the difference is rated to be very_high_neg [-1.14]</td> </tr> <tr> <td>at: 06.10.1989,10:00:00</td> <td>the difference is rated to be very_high_neg [-1.20]</td> </tr> <tr> <td>at: 09.10.1989,10:00:00</td> <td>the difference is rated to be very_high_neg [-1.25]</td> </tr> <tr> <td>.....</td> <td></td> </tr> <tr> <td>.....</td> <td></td> </tr> <tr> <td>at: 25.10.1989,10:00:00</td> <td>the difference is rated to be very_high_neg [-5.03]</td> </tr> </table> <p style="margin-left: 20px;">Hinweis: Große Setzungsdifferenzen weisen auf eine asymmetrische Belastung der Kalottenfüße hin. Es sollten in diesem Fall folgende Maßnahmen ergriffen werden:...</p> <p style="margin-left: 20px;"><u>Explanation</u></p>		at: 29.09.1989,10:00:00	the difference is rated to be high_neg [-0.77]	at: 02.10.1989,10:00:00	the difference is rated to be high_neg [-0.99]	at: 03.10.1989,10:00:00	the difference is rated to be very_high_neg [-1.08]	at: 04.10.1989,10:00:00	the difference is rated to be very_high_neg [-1.11]	at: 05.10.1989,10:00:00	the difference is rated to be very_high_neg [-1.14]	at: 06.10.1989,10:00:00	the difference is rated to be very_high_neg [-1.20]	at: 09.10.1989,10:00:00	the difference is rated to be very_high_neg [-1.25]		at: 25.10.1989,10:00:00	the difference is rated to be very_high_neg [-5.03]
at: 29.09.1989,10:00:00	the difference is rated to be high_neg [-0.77]																				
at: 02.10.1989,10:00:00	the difference is rated to be high_neg [-0.99]																				
at: 03.10.1989,10:00:00	the difference is rated to be very_high_neg [-1.08]																				
at: 04.10.1989,10:00:00	the difference is rated to be very_high_neg [-1.11]																				
at: 05.10.1989,10:00:00	the difference is rated to be very_high_neg [-1.14]																				
at: 06.10.1989,10:00:00	the difference is rated to be very_high_neg [-1.20]																				
at: 09.10.1989,10:00:00	the difference is rated to be very_high_neg [-1.25]																				
.....																					
.....																					
at: 25.10.1989,10:00:00	the difference is rated to be very_high_neg [-5.03]																				
The system detected 21 remarkable incidents																					

Abb. 67: Systembericht des Prototyps

Laufzeitperformanz des Prototyps

Zur Auswertung obigen Beispiels sind alle 142 Messfakten des betrachteten Messquerschnitts (also auch jene der unbeteiligten Punkte 1, 2, 3, 6 und 7), die beiden Regeln für Erkennen und Berichten, jener das Erwartungs- und Bewertungswissen spezifizierende Fakt (*exp_diff_func*) und der Regelauswahlfakt (*rule 203.1*) (siehe auch Kapitel 5.5.3 Seite 93) im working memory geladen. Die Inferenzlaufzeit beträgt (für einen PC 1300 MHz, 512 MB, MS-Windows 2000) weniger als eine Sekunde. Die folgenden Tabellen 4.1 und 4.2 zeigen die Inferenzlaufzeiten **Lges** (mm:ss) nach Steigerung der Datenmenge zufolge einer schrittweisen Verlängerung der Projektdauer **T** (in Monaten). Es wird dieselbe Erwartung für die Punkte 4 und 5 auf alle vorhandenen Messquerschnitte ausgedehnt. **MF** gibt die Anzahl der gesamten Messfakten, **RMF** die Anzahl der daraus die Punkte 4 oder 5 betreffenden Messfakten, **R2** die Anzahl der gefundenen Auffälligkeiten (= Regelfeuerungen der Berichtsregel) bei einer globalen Bewertungsgrenze von 0,75 an.

Anzahl der Messfakten MF / Anzahl der Messfakten RMF / Projektzeitraum T							
MF / RMF T	107 / 39 0,5	353 / 95 1	1143 / 259 2	1637 / 375 3	2110 / 393 4	3120 / 566 5	4066 / 747 6
Lges	00:00	00:00	00:00	00:01	00:02	00:07	00:08
R2	16	44	84	86	86	86	86

Tabelle 4.1: Laufzeitperformanz des Prototyps für die Projektzeiträume von 0,5 bis 6 Monate

Anzahl der Messfakten MF / Anzahl der Messfakten RMF / Projektzeitraum T						
MF / RMF T	6776 / 1209 9	8700 / 1575 12	14171 / 2321 18	35480 / 7105 24	58006 / 11629 36	60118 / 12136 41 (Prj.-ende)
Lges	00:29	00:49	01:30	09:31	25:17	36:14
R2	87	88	90	346	364	368

Tabelle 4.2: Laufzeitperformanz des Prototyps für die Projektzeiträume von 9 bis 41 Monate

Die Inferenzlaufzeiten sind bis zu einer Projektdauer von 12 Monaten noch akzeptabel klein (innerhalb einer Minute) und dies obwohl die numerische Berechnung aller Bewertungszahlen und -symbole zur Laufzeit vorgenommen werden muss. Es zeigt sich allerdings, dass der Großteil der im Beispielprojekt gefundenen Auffälligkeiten (= Feuerungen der Berichtsregel) erst nach dem 18. Monat auftritt.

Um für eine konstante Datenmenge die Laufzeitanteile der einzelnen Bearbeitungsschritte für das Erkennen und Berichten besser differenzieren zu können, wird die globale Bewertungsgrenze **BG**, ab der eine Auffälligkeit dynamisch faktenrepräsentiert und berichtet wird, schrittweise herabgesetzt. Zusätzlich wird Erwartungswissen bzgl. der Setzungsdifferenzen für alle 21 möglichen Punktepaare eines Messquerschnitts bestehend aus 7 Messpunkten (1-2, 1-3, ..., 6-7) spezifiziert, um die Anzahl möglicher Auffälligkeiten noch zu erhöhen. Die Anzahl **R1** der bildbaren Setzungsdifferenzen (= Feuerungen der Erkennungsregel) bleibt hernach zwar immer konstant (ebenso die Anzahl der zu berechnenden Bewertungen); dynamisch repräsentiert werden jedoch nur jene Messfakten, die die Bewertungsgrenze erreichen. Tabelle 5 zeigt die Inferenzlaufzeiten der einzelnen Bearbeitungsschritte für eine Projektdauer von 12 Monaten. In der Tabelle bezeichnet:

- L1** die Zeit für den Musterungsprozess der Vorbedingungen der Erkennungsregel (Feststellen aller bildbaren Setzungsdifferenzen, für die Erwartungswissen vorhanden ist),
- L2** die Zeit für das Ausführen des Aktionsteils der Erkennungsregel (Berechnen aller Bewertungszahlen und -symbole, Faktenrepräsentieren aller die Bewertungsgrenze erreichenden und damit auffälligen Messfakten),
- L3** die Zeit für den Aufbau des Ausgabeberichts (Suchen des jeweils nächsten auszugebenden Messfakts, Ausgeben des Messfakts, Modifizieren des Messfakts, dass er ausgegeben wurde),
- Lges** die Summe der Zeiten aus L1 bis L3 und
- F** die Anzahl der gefundenen Auffälligkeiten

Messfakten = 8700 / R1 = 11939 / Projektdauer = 12 Monate						
BG	----- ≥ 100	sehr stark ≥ 1	>=stark ≥ 0.75	>=mittel ≥ 0.5	>=gering ≥ 0.25	>= sehr gering > 0
L1	00:57	00:58	00:58	00:58	00:58	00:58
L2	00:21	00:21	00:21	00:21	00:22	00:23
L3	00:00	00:04	00:09	00:22	00:48	03:16
Lges	01:18	01:23	01:28	01:41	02:08	04:27
F	0	1959	2651	4104	6009	11939

Tabelle 5: Laufzeiten einzelner Bearbeitungsschritte bei verschiedenen Bewertungsgrenzen

Tabelle 5 zeigt zunächst, dass die Laufzeit **L2** (21-23 Sekunden) ca. 36% der Laufzeit **L1** (58 Sekunden) beträgt, der Musterungsprozess der Erkennungsregel also wie erwartet aufwändiger ist und daher mehr Zeit als das Ausführen des Aktionsteils benötigt. **L2** bleibt annähernd konstant, unabhängig davon, ob keine oder einige tausend auffällige Messfakten dem working memory dynamisch hinzugefügt werden müssen. Innerhalb **L2** ist daher die Berechnungszeit für Bewertungszahlen und -symbole der bestimmende Faktor. Die benötigte Zeit **L3** für das Erstellen des Ausgabeberichts fällt erst bei einigen tausend zu berichtenden Auffälligkeiten ins Gewicht. Aus praktischer Sicht wird daher stets die Laufzeit **L1**, also die Ermittlung und systeminterne Zwischenspeicherung der Konfliktmenge (*conflict set*), das ist die Menge aller möglichen Setzungsdifferenzen, die gebildet werden können und an die eine Erwartung gebunden ist, den Hauptanteil der Inferenzlaufzeit **Lges** ausmachen.

Um zusätzlich noch den zeitlichen Einfluss der mathematischen Komplexität der der Erwartung zugrunde liegenden Verschiebungskurve zu untersuchen, wird an Stelle der Erwartung, dass die Setzungsdifferenzen konstant 0 sein sollten, eine charakteristische Verformungskurve gemäß Abb. 47, Seite 84 an die Setzungsdifferenzen gebunden. Sie wird derart parametrisiert, dass sie der obigen konstanten Erwartungsfunktion im Ergebnis mathematisch entspricht, die Anzahl der jeweiligen Regelfeuerungen also gleich dem vorigen Beispiel ist. Es muss nur eine aufwändigere Prozedur im Zuge der Inferenz ausgewertet werden. Die Laufzeit **L2** erhöht sich um 3 Sekunden, der Einfluss ist also sehr gering.

Im folgenden soll noch jener Einfluss untersucht werden, der von der Anzahl **Anz** der geladenen und abzuarbeitenden Regelpaare (Erkennen und Berichten) auf die Inferenzlaufzeit ausgeübt wird. Zu diesem Zweck wird diese Anzahl schrittweise von 1 auf 12 erhöht. Hierzu werden sowohl Prognosen als auch Erwartungen (Abb. 53, Seite 88) an alle Messfakten, für jeden Messfakt an alle drei Verschiebungskomponenten (Längs-, Quer-, Vertikalverschiebung) und für jede Komponente sowohl an die absolute (gegenüber der Nullmessung) als auch relative (bzgl. der vorhergehenden Messung) Verschiebung gebunden. Die Berechnung der Bewertungszahlen und -symbole und das Laden derselben ins working memory erfolgt diesmal noch vor der Inferenz. Die Zeit, die das System für diesen einmalig auszuführenden Vorverarbeitungsprozess benötigt, beträgt bei 8700 Messungen ca. 2 Minuten. Es liegen hernach $2 \times 3 \times 2 = 12$ Einzelbewertungen für jeden Messfakt vor. Insgesamt sind somit $12 \times 8700 = 104400$ Bewertungen im System repräsentiert. Jede Regel prüft für jeden Messfakt jeweils eine seiner 12 Bewertungen auf Überschreitung der globalen Bewertungsgrenze, die Regeln sind daher in ihrer Syntax gleichartig. Die Bewertungsgrenze wird mit 0 spezifiziert, sodass jede Regel bei jedem Messfakt genau einmal, also insgesamt 8700 mal feuert.

Die sich nunmehr ergebenden Inferenzlaufzeiten **L1**, **L2**, **L3** und **Lges** sind in Tabelle 6 angeführt. Zum Unterschied zu Tabelle 5 bedeutet nun:

- L1** die Zeit für den Musterungsprozess der Vorbedingungen der Erkennungsregel
(Feststellen aller die Bewertungsgrenze 0 erreichenden Bewertungen),
- L2** die Zeit für das Ausführen des Aktionsteils der Erkennungsregel
(Faktenrepräsentieren aller auffälligen Messfakten),
- L3** die Zeit für den Aufbau des Ausgabeberichts
(Suchen des jeweils nächsten auszugebenden Messfakts, Ausgeben des Messfakts,
Modifizieren des Messfakts, dass er ausgegeben wurde),
- Lges** die Summe der Zeiten aus L1 bis L3 und
- F** die Anzahl der gefundenen Auffälligkeiten

Messfakten = 8700 / Bewertungen = 104400 / Projektdauer = 12 Monate												
Anz	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
L1	00:33	01:07	01:42	02:15	02:48	03:21	03:56	04:29	05:02	05:35	06:08	06:41
L2	00:00	00:00	00:01	00:01	00:02	00:02	00:03	00:03	00:04	00:04	00:05	00:05
L3	01:40	03:40	06:19	10:15	14:21	18:55	23:01	28:07	33:12	38:36	44:51	51:50
Lges	02:13	04:47	08:02	12:31	17:10	22:18	23:33	32:39	38:17	44:15	51:04	58:36
F	8700	2x8700	3x8700	4x8700	5x8700	6x8700	7x8700	8x8700	9x8700	10x8700	11x8700	12x8700

Tabelle 6: Laufzeiten einzelner Bearbeitungsschritte zufolge einer Steigerung der Regelanzahl

Wie ersichtlich sind die Laufzeiten **L1** direkt proportional zur Anzahl der gleichzeitig geladenen Regelpaare. Dies ist aufgrund der Gleichartigkeit der Syntax der Regelvorbedingungen auch zu erwarten. Der mit **L2** verbundene Bearbeitungsschritt läuft äußerst rasch ab, mehr als 100.000 Auffälligkeiten können innerhalb von 5 Sekunden dynamisch faktenrepräsentiert werden. Der Berichtsaufbau **L3** dauert aufgrund der simulierten großen Menge an Auffälligkeiten vergleichsweise am längsten. Wird insgesamt nur eine beschränkte Anzahl an Auffälligkeiten (< 100) gefunden, reduzieren sich sowohl **L1**, **L2** als auch **L3** auf wenige Sekunden. Obige Laufzeiten basieren auf Inferenzen über Bewertungszahlen. Es müssen also reelle Zahlen mit der globalen Bewertungsgrenze numerisch verglichen werden - ein rechenintensiver Vorgang. Wird über Bewertungssymbole inferenziert, ergeben sich bei diesem Test allerdings dennoch keine merklichen Laufzeitverbesserungen.

Aus den Ergebnissen der durchgeführten Laufzeittests kann ein Eindruck über die benötigten Inferenzzeiten bei einem realen Projekt gewonnen werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass Analysen auf Basis von Prognosen und Erwartungen von Datenmengen, die bei Projektlaufzeiten von mehreren Monaten anfallen und falls, wie bisher üblich, einmal täglich gemessen wird, ohne enervierend lange Wartezeiten für den Benutzer durchaus in einem Guss ausgeführt werden können. Dies entspräche der Aufgabe einer nachträglichen Analyse der Daten eines Projekts. Sind die Messintervalle dichter, die Datenmengen größer, so ist der Analysezeitraum entsprechend einzugrenzen. Wird hingegen nur über die aktuellsten Messungen sofort nach deren Vorliegen inferenziert, ist der Laufzeitaspekt überhaupt von inferiorer Bedeutung. Innerhalb von Sekunden liegen dann die Ergebnisse vor.

Qualität der Ergebnisse, Fehlaussagen

Die Zuverlässigkeit der Ergebnisse soll wieder anhand der möglichen, gegenüber der Realität fehlerhaften oder fehlenden Meldungen im Bericht diskutiert werden. Es können die folgenden dem Verfahren anzulastende bzw. zufolge fehlerhafter Eingaben verursachte Fehler auftreten:

1. Eine in der Realität vorhandene Auffälligkeit wird nicht erkannt.

Dieser Fall kann auftreten, falls

- aufgrund von erkannten Messfehlern über die entsprechenden Messfakten nicht inferenziert wird (obwohl ein Experte dies unter Umständen dennoch könnte),
- nicht erkannte Messfehler das Nicht-Vorhandensein der Auffälligkeit vortäuschen (ein Messfehler verhindert quasi die Sichtbarkeit der Auffälligkeit für das System, es liegt eine *Fehlermaskierung* vor),
- aufgrund fehlender Messungen die Auffälligkeit nicht entdeckt werden kann (ob Messungen fehlen, müsste dazu vorab überprüft werden),
- die Prognose bzw. Erwartung bereits unkorrekt ist (falls beispielsweise Prognose bzw. Erwartung zwar den tatsächlichen Verschiebungen entspricht, diese aber für das Bauwerk dennoch bereits kritisch sind),
- Prognosen bzw. Erwartungen überhaupt fehlen,
- das Bewertungsmodell die Abweichungen zu großzügig bewertet, die Bewertungszahlen also zu klein sind,
- jene empirische Messungenaugkeit, die die Bewertung der Abweichung von der Prognose bzw. Erwartung künstlich erhöht (verschlechtert), für den konkreten Fall zu klein gewählt war, die tatsächliche Messungenaugkeit also größer ist.

2. Eine in der Realität vorhandene Auffälligkeit wird *zu spät* erkannt.

Dieser Fall tritt streng genommen immer auf, da auf Basis diskreter Messungen analysiert wird und der exakte Zeitpunkt des Ereignisses nicht rekonstruierbar ist. Der Fall wird im Anwendungsgebiet aber dann unangenehm, falls

- Messungen über einen *zu langen* Zeitraum, in dem das Ereignis wohl tatsächlich stattfand, fehlen.

3. Eine in der Realität nicht vorhandene Auffälligkeit wird zu Unrecht gemeldet.

Dieser Fall kann auftreten, falls

- nicht erkannte Messfehler die Auffälligkeit vortäuschen, wobei zu beachten ist, dass ein solches Fehlergebnis auch von Experten oftmals erst nach Vorliegen weiterer Daten korrigiert werden kann und daher für Letztmessungen nicht unbedingt falsch ist,
- die Prognose bzw. Erwartung bereits unkorrekt ist (falls beispielsweise sehr geringe Verschiebungen erwartet werden, wesentlich größere tatsächlich auftreten und dies aber für das Bauwerk eigentlich dennoch unbedenklich ist),
- das Bewertungsmodell der Abweichungen zu vorsichtig, die Bewertungszahlen also zu groß sind,
- jene empirische Messungenauigkeit, die die Bewertung der Abweichung von der Prognose bzw. Erwartung künstlich verschlechtert, zu groß gewählt wird.

Die Zuverlässigkeit der Analyseergebnisse ist wie erkennbar von einer Reihe von Faktoren abhängig. Es wird wieder unterstellt, dass Messfehler erkannt und vorab exkludiert werden können. Gelingt dies nicht, so sind die in der Folge möglichen Fehlaussagen nur dann dem System anzulasten, falls ein Experte diese Messfehler erkannt hätte. Weiters sind die Qualität des Prognose- bzw. Erwartungswissens und des Bewertungsmodells ausschlaggebend. Wird dieses unzureichend spezifiziert, so sind die damit verbundenen Fehlaussagen dem Benutzer anzulasten. Auf eine eingehende Untersuchung und Zusammenstellung der bei den Testdaten konkret aufgetretenen, fehlerhaften Analyseergebnisse wird, da aus ihnen keine allgemein (für andere Daten) gültigen Schlüsse (z.B. über die zu erwartende Häufigkeit ihres Auftretens, über ihre Relevanz für das Projekt, ...) abgeleitet werden können, verzichtet.

Verwendungsziel der Vorgehensweise

Die beschriebene Vorgehensweise kann sowohl zur nachträglichen Beurteilung einer größeren Messfaktenmenge und damit längerer Beobachtungszeiträume als auch zur laufenden, zeitnahen Überwachung aller Messungen eines Projekts angewandt werden. Manuell wie bisher, aber auch automatisch gemessene Verschiebungen sind grundsätzlich analysierbar. Hauptvoraussetzung ist allerdings, dass entsprechend exaktes Wissen über prognostizierte und erwartete Verschiebungen vorliegt, eine Forderung, die zu Beginn eines Projekts wohl nicht immer erfüllt werden kann. Es soll wiederholt werden, dass die Vorgehensweise derart allgemein ist, dass sie nicht nur für das Anwendungsgebiet des Tunnelbaus geeignet erscheint.

6.3 Erkennen eines Fehlers mittels Unsicheren Schließens

Das in Kapitel 5.5.3, Seite 95 ff entwickelte Verfahren unsicheren quantitativen Schließens auf Basis der Methode der Certainty Factors ist zur Ermittlung einer fehlerhaften Messepoche anzuwenden. Zur Erprobung des Verfahrens werden zunächst wieder die Daten des auch in den vorigen Beispielen genutzten Projekts herangezogen. Zur Prüfung, ob überhaupt eine Messepoche in Bezug auf das Fehlermuster *Haken* verdächtigt werden kann, werden folgende Einstellungen im Prototyp vorgenommen:

- für die Auffälligkeitsbewertung der Hakenhöhe dh_2 (Abb. 61, Seite 95):
untere Grenze = - 10 mm obere Grenze = 10 mm Toleranz = 3 mm
- für die empirische Messungenauigkeit m :
 $m = 2$ mm
- für die globale Bewertungsgrenze BG:
BG = 0,5

Die Einstellungen legen zunächst fest, dass eine Hakenhöhe dh_2 von 8 mm bzw. - 8 mm unter Berücksichtigung der Messungenauigkeit bereits als *sehr stark* auffällig bewertet wird (Bewertungszahl 1 bzw. -1). Es wird also, um sicher zu gehen, empirisch angenommen, dass die tatsächliche Hakenhöhe durchaus auch 10 mm bzw. -10 mm betragen könnte. Jede Hakenhöhe kleiner 1 mm wird als unauffällig erachtet. Erreicht sie 1 mm, wird sie zumindest bereits als sehr gering auffällig angesehen. Mit BG = 0,5 spezifiziert der Benutzer, dass er grundsätzlich nur an Haken *mittlerer* und noch stärkerer Auffälligkeit ($dh_2 \geq 4,5$ mm) interessiert ist, er also über *gering* oder *sehr gering* fehlerhafte Messepochen gar nicht informiert werden will. Die Regel aus Abb. 62, Seite 96 und die dazu symmetrische Regel (positive und negative Haken im Setzungsverlauf) werden auf die 12-Monatsdaten angewandt.

Von insgesamt 309 Messepochen werden nur drei Messepochen verdächtigt, d.h. nur in diesen Epochen tritt in zumindest einer Messung ein entsprechend hoher Haken auf. Konkret gefunden wurden zwei positive (bei MQ 51, P_Nr 2 am 26.03.1990, bei MQ 349, P_Nr 4 am 29.04.1990) und ein negativer Haken (bei MQ 51, P_Nr 2 am 14.02.1990). Diese Messepochen sind nunmehr durch Verdachtsfakten *markiert* und werden näher untersucht. Eigene Regeln werden von den Verdachtsfakten angestoßen und wenden die Methode der Certainty Factors an, wobei für die elementaren CF's der Fakten sowie für die Berechnungsfunktion die fixen Angaben aus Kapitel 5.5.3, Seite 97 gelten. Für die Wahl der Regel CFs r_1 , r_2 und r_3 gelten die folgenden intuitiven Werte:

- $r_1 = 0,3 e^{-(bew_diff)^2}$

Aus einem auffälligen Haken kann auf die Hypothese „Standpunktsfehler“ geschlossen werden.

- $r_2 = - 0,1$

Aus einem unauffälligen oder nicht vorhandenen Haken kann auf die Hypothese geschlossen werden.

- $r_3 = - 0,5$

Aus einem entgegengesetzt auffälligen Haken kann auf die Hypothese geschlossen werden.

Begründung

Mit $r1$ wird festgelegt, dass, würde eine Messepoche aus nur einer einzigen auffälligen Messung bestehen, das Vorliegen einer fehlerhaften Standpunktshöhe mit einer Gewissheit von 0,3 behauptet wird. Dies entspricht größenordnungsmäßig insofern den Erfahrungen im Anwendungsgebiet, als in so einem Fall auch eine Reihe anderer zufälliger oder systematischer Messfehler grundsätzlich in Frage kommen, in der Regel auch häufiger auftreten und daher in Summe eher wahrscheinlich sind (individuelle Zielfehler, Erschütterung während der Messung, etc.). Besteht eine Messepoche nun aus mehreren Messungen, die alle gleichartig auffällig sind, so hängt $r1$ zusätzlich von der Größengleichheit des Fehlerindikators *Haken* ab. Dies entspricht dem Wissen, dass, soll der Standpunktfehler die alleinige Ursache sein, theoretisch die geforderte Größengleichheit sichtbar werden muss. Je schlechter diese Forderung eine Messung erfüllt, desto geringer wird ihr ursprünglicher Gewissheitswert von 0,3, mit der sie auf den Standpunktfehler hinweist. Die Herabstufungsfunktion $e^{-(bew_diff)^2}$ reflektiert und modelliert nun dieses Wissen in folgender Weise (Tabelle 7):

bew_diff	0	± 0,2	± 0,4	± 0,6	± 0,8	± 1,0	± 2,0	± 3,0
<i>diff [mm]</i>	0	± 1,4	± 2,8	± 4,2	± 5,6	± 7,0	± 14,0	± 21,0
<i>r1</i>	0,3	0,29	0,25	0,21	0,16	0,11	0,01	0,00

Tabelle 7: Certainty Factors $r1$ bei unterschiedlichen Bewertungsdifferenzen zur mittleren Hakenhöhenbewertung

Erfüllt eine Messung die Forderung optimal, so wird ihr Gewissheitswert nicht herabgestuft. Weist die Bewertung ihrer Hakenhöhe eine Abweichung von $\pm 0,2$ gegenüber dem Mittel auf, was auf Basis des gewählten Bewertungsmodells einer Abweichung von nur $\pm 1,4$ mm entspricht, so wird ihr Gewissheitswert nur geringfügig auf 0,29 verringert. Beträgt die Abweichung jedoch bereits ± 7 mm, so wird dieser bereits auf 0,11 verkleinert, beträgt also nur mehr rund 30% des Ausgangswerts. Die gewählte Herabstufungsfunktion verhält sich also gegenüber kleinen Abweichungen noch liberal, große Abweichungen jedoch werden relativ stark und allzugroße auf annähernd Null herabgestuft. Letztere leisten dann fast keinen Beitrag mehr zur Stützung der Fehlerhypothese.

Mit $r2$ wird ausgesagt, dass jede Messung, die den Fehlerindikator nicht aufweist zwar verhältnismäßig gering, aber doch konstant gegen die Fehlerhypothese spricht. Da mit $-0,1$ der Wert also klein ist, ist der Beitrag einer unauffälligen Messung am Gesamtergebnis insgesamt gering. Damit kann die negative Auswirkung des im Modell nicht berücksichtigten Falls, dass eine Messung aufgrund zeitgleicher Deformationen oder zusätzlicher anderer Fehler den Indikator nicht zeigt, auf das Endergebnis klein gehalten werden.

Mit $r3$ wird angegeben, dass jede Messung, die sogar den umgekehrten Fehlerindikator zeigt, mit $-0,5$ erheblich stärker aber wieder konstant gegen die Fehlerhypothese spricht. Eine solche Messung wird von Experten erfahrungsgemäß als stark irritierend in Bezug auf die Hypothese beurteilt.

Das inferenzierte Endergebnis für die drei ursprünglich verdächtigten Messepochen zeigt Abb. 68. Es ergibt sich, dass die Hypothese für keine der ursprünglich verdächtigten Messepochen bestätigt wird. Hauptgrund ist, dass die Zahl der unauffälligen Messungen überwiegend groß ist.

Um überhaupt eine Ausgabe zu erhalten, musste der CF-Grenzwert für das Berichten des Fehlers auf -1 herabgesetzt werden; daher ist die Ausgabe etwas irritierend.

DATA QUALITY REPORT	Project: TEST
created : Wed Jul 31, 2002 15:01:12	
applied rule set: error_check.rst	(nr of used rules: 15)
used fact file: nordvortrieb_def.fct	
specified rating limit: ± 0.50 [medium]	
specified certainty limit: -1	
<hr/>	
<u>REMARKABLE SYSTEMATIC STATION ERROR ASSUMED !---type: 3.0</u>	
A systematic error in the determination of the instrument height is assumed !!	
<hr/>	
<ul style="list-style-type: none"> • measuring epoch 14.02.1990,11:00:00 shows the error with a certainty of: -0.96 and a mean rating of: -0.35 [little_neg] 	
3 measurements support the error assumption, 39 do not support and 0 contradict !!!	
<hr/>	
<u>REMARKABLE SYSTEMATIC STATION ERROR ASSUMED !---type: 3.1</u>	
A systematic error in the determination of the instrument height is assumed !!	
<hr/>	
<ul style="list-style-type: none"> • measuring epoch 26.03.1990,12:00:00 shows the error with a certainty of: -0.89 and a mean rating of: 0.29 [little_pos] 	
3 measurements support the error assumption, 30 do not support and 0 contradict !!!	
<ul style="list-style-type: none"> • measuring epoch 29.04.1990,10:00:00 shows the error with a certainty of: -0.94 and a mean rating of: 0.27 [little_pos] 	
6 measurements support the error assumption, 40 do not support and 1 contradict !!!	
<hr/>	
The system detected 3 remarkable incidents	
<hr/>	

Abb. 68: Systembericht des Prototyps

Laufzeitperformanz des Prototyps

Zur Auswertung der 12-Monatsdaten (8700 Messfakten, 309 Messepochen) benötigt der Prototyp unter der gegebenen Parametrisierung 3min 28s. Entscheidend für die Laufzeit ist neben der Datenmenge die Anzahl der Epochen, die zu Beginn verdächtigt werden und weiter zu untersuchen sind. Im vorliegenden Beispielprojekt sind bei jedem Verdacht durchschnittlich 30 weitere Messungen im Zuge der Inferenz zu suchen, zu bewerten und nach der CF-Methode zu verrechnen. Das Bewertungsmodell (untere Grenze, obere Grenze, Toleranz) sowie die Bewertungsgrenze BG steuern diesen Prozess. Die folgende Aufstellung (Tabelle 8) zeigt die Laufzeiten **Lges** (hh:mm:ss) für unterschiedliche Werte der Bewertungsgrenze **BG** bei ansonsten unveränder-

ter Parametrisierung des Bewertungsmodells (Seite 117 oben). **Anz** bezeichnet in der Tabelle die Anzahl der jeweils verdächtigten Messepochen. Sie werden unabhängig davon, ob sich der Verdacht bestätigt oder nicht, sortiert und ausgegeben.

Messfakten = 8700 / Messepochen = 309 / Projektdauer = 12 Monate										
BG	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Lges	1:27:03	26:23	13:17	07:52	03:28	02:30	02:30	01:46	01:46	00:59
Anz	110	33	16	9	3	2	2	1	1	0

Tabelle 8: Laufzeiten und Anzahl verdächtigter Epochen bei unterschiedlichen Bewertungsgrenzen

Die Ergebnisse zeigen allgemein ein seltenes Auftreten von Verdachtsfällen im Datenmaterial. Haken sehr starker Auffälligkeit ($BG \geq 1$) treten nicht mehr auf. Bei einer Bewertungsgrenze von $BG \leq 0,2$ werden Messepochen bereits doppelt verdächtig, d.h., es werden sowohl positive als auch negative Haken in ihnen gefunden - der Bereich der Messgenauigkeit ist erreicht. Das Resultat macht deutlich, dass die Laufzeit unmittelbar von der Häufigkeit des Auftretens des Fehlermusters Haken abhängig ist. Eine Abschätzung in der Praxis zu erwartender Rechenzeiten, falls größere Datenmengen (= längere Projektzeiträume) in einem Guss analysiert werden sollen, ist aufgrund dieser Abhängigkeit schwierig.

Um den alleinigen Einfluss der Datenmenge zu beurteilen, wird im nächsten Versuch (Tabellen 9.1 und 9.2) **BG** mit 0,9 konstant belassen und der Projektzeitraum **T** (in Monaten) variiert. Es wird damit stets nur eine Messepoche verdächtig (**Anz** = 1).

Anzahl der Messfakten MF / Projektzeitraum T / BG = 0,9 / Anz = 1							
MF / T	107 / 0,5	353 / 1	1143 / 2	1637 / 3	2110 / 4	3120 / 5	4066 / 6
Lges	00:00	00:00	00:01	00:02	00:04	00:10	00:18

Tabelle 9.1: Laufzeiten für die Projektzeiträume von 0,5 bis 6 Monate

Anzahl der Messfakten MF / Projektzeitraum T / BG = 0,9 / Anz = 1				
MF / T	6776 / 9	8700 / 12	14171 / 18	35480 / 24
Lges	01:05	02:01	06:44	1:13:28

Tabelle 9.2: Laufzeiten für die Projektzeiträume von 9 bis 24 Monate

Es zeigt sich, dass die Laufzeit erst bei einer Projektdauer von 9 Monaten die Minutengrenze überschreitet. Noch länger währende Projektzeiträume sind nur mehr bei Inkaufnahme bereits erheblich länger und immer rascher zunehmender Laufzeiten zu bewältigen. Eine Unterteilung des Gesamtdatenbestands, eventuell wieder in Monatsabschnitte, und eine getrennte, sequentielle Analyse derselben, vermeidet diesen Nachteil.

Wird der Prototyp im Sinne eines täglich zu nutzenden Überwachungswerkzeugs zur Fehleranalyse der jeweils aktuellsten Messepochen eingesetzt, so kann wiederum innerhalb weniger Sekunden mit dem Vorliegen von Ergebnissen gerechnet werden.

Qualität der Ergebnisse, Fehlaussagen

Die Qualität des Systemergebnisses ist im Vergleich mit dem intuitiven Ergebnis eines menschlichen Experten nach manueller Beurteilung der Messungen zu finden. Das Resultat kann insbesondere durch die Festlegung der initialen Regel-CFs und der Herabstufungsfunktion beeinflusst werden. Tabelle 10 zeigt die resultierenden Wahrheitswerte **CF** der Aussage: *Es liegt ein Standpunktsfehler vor* und die gemittelten Bewertungen **BEW** der Hakenhöhen, die das Auffälligkeitsmaß des Fehlers beschreiben, für die in den Abbildungen 69.1 – 69.9 dargestellten, simulierten Verschiebungsdaten. Die Diagramme stellen die Zeit-Setzungsverläufe von sieben Messpunkten dar. In der Simulation soll davon ausgegangen werden, dass es sich dabei um alle von einem Standpunkt aus gemessenen Punkte handelt. Es werden die auf Seite 117 vorgegebenen Parameterwerte verwendet.

Abbildung	69.1	69.2	69.3	69.4	69.5	69.6	69.7	69.8	69.9
CF	-	0,92	0,92	0,87	0,79	0,62	0,32	-0,23	0,56
BEW	-	0,45	0,73	0,74	0,71	0,71	0,71	1,17	1,34

Tabelle 10: Resultierende Certainty Factors und Auffälligkeitsmaße zu den Abbildungen 69.1 – 69.9

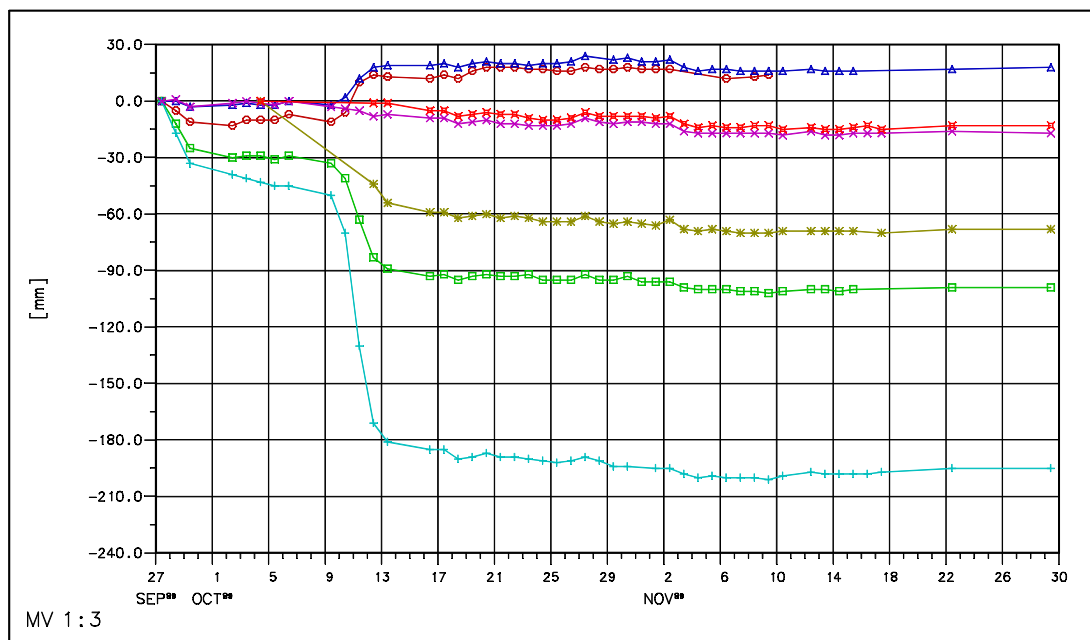


Abb. 69.1: Fehlerunauffälliger Setzungsverlauf

Alle in Abb. 69.1 sichtbaren Haken liegen unterhalb der Bewertungsgrenze ($BG \leq 0,5$). Es wird daher kein Verdacht ausgesprochen. Selbst wenn ein Standpunktsfehler vorhanden wäre (eventuell in den Messungen vom 27.10.), wird er aufgrund seiner zu geringen Auffälligkeit vom System als unbedeutend eingestuft.

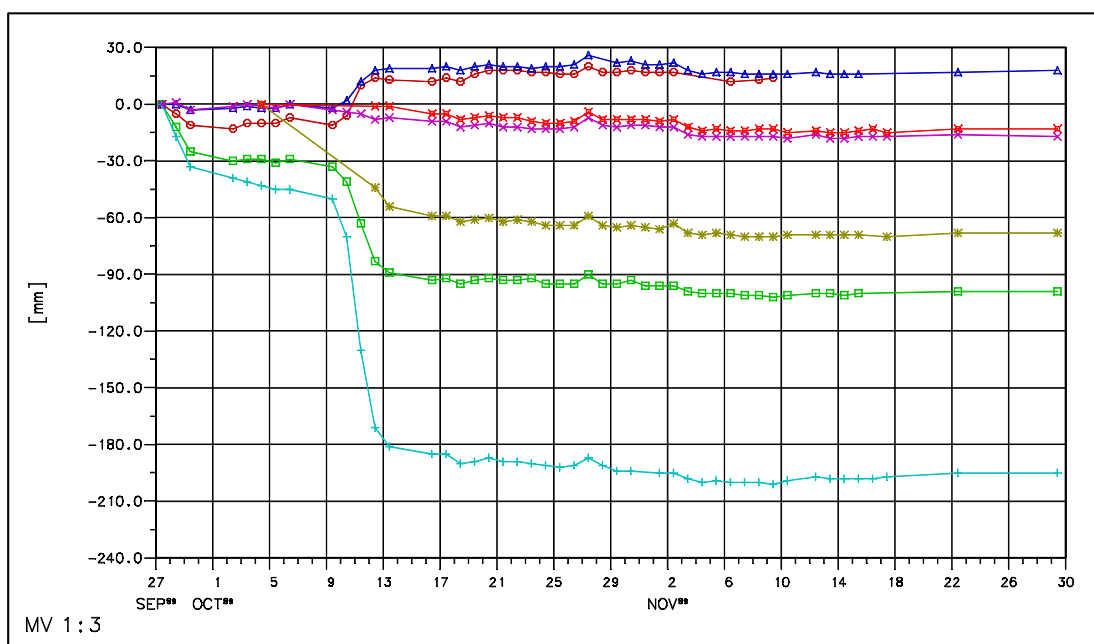


Abb. 69.2: Gering auffällige, gleichgerichtete und höhengleiche Hakensystematik

Abb. 69.2 zeigt am 27.10. bei allen Messpunkten einen kleinen, in etwa gleich großen und bereits auffälligen Haken. Das Mittel der Bewertungen aller Haken ist mit 0,45 zwar knapp unterhalb der Grenze von 0,5; zumindest einer der Haken wurde aber höher bewertet und löste den Verdacht aus. Es wird auf den Fehler mit einem bereits sehr hohen Gewissheitsfaktor von 0,92 geschlossen.

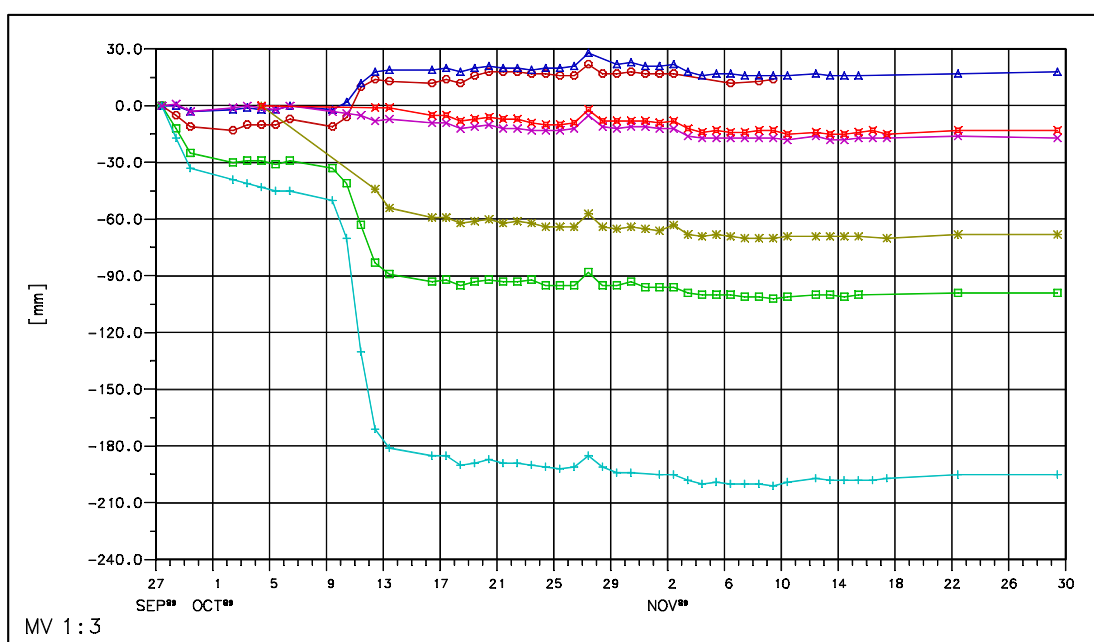


Abb. 69.3: Mittel auffällige, gleichgerichtete und höhengleiche Hakensystematik

In Abb. 69.3 ist der Haken noch ausgeprägter. Das Auffälligkeitsmaß des Fehlers ist mit 0,73 als bereits *mittel* klassifiziert. Der Gewissheitsfaktor des Schlusses ist jedoch unverändert hoch 0,92.

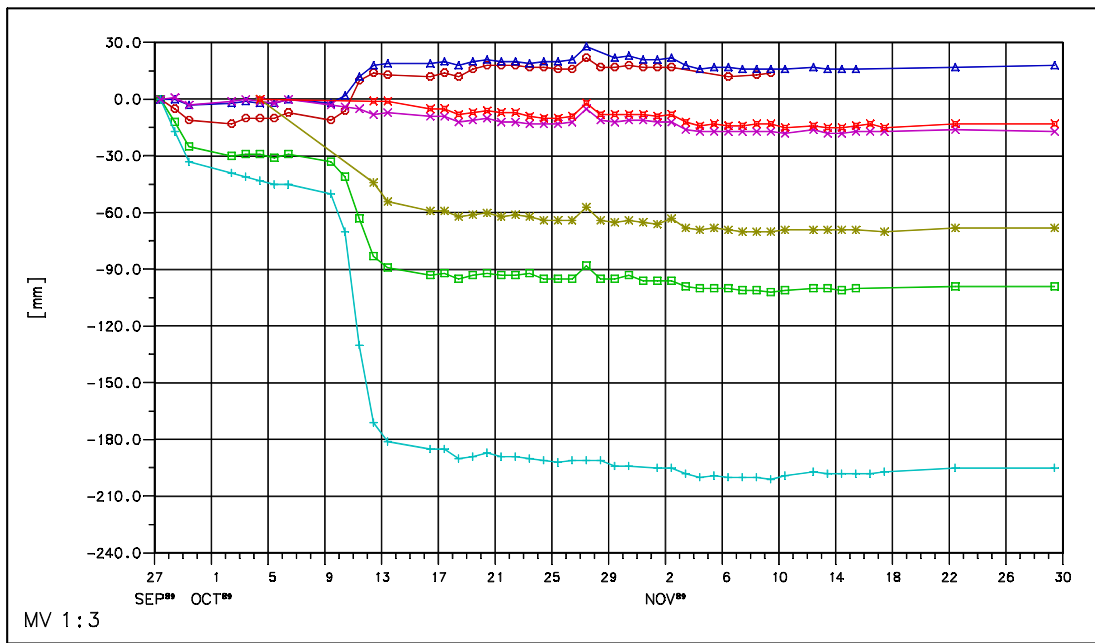


Abb. 69.4: Mittel auffällige, mit einer Ausnahme gleichgerichtete und höhengleiche Hakensystematik

Der Haken tritt in einem Setzungsverlauf nicht, in allen anderen in unveränderter Form auf. Der Gewissheitsfaktor reduziert sich auf 0,87, das Auffälligkeitsmaß bleibt annähernd gleich.

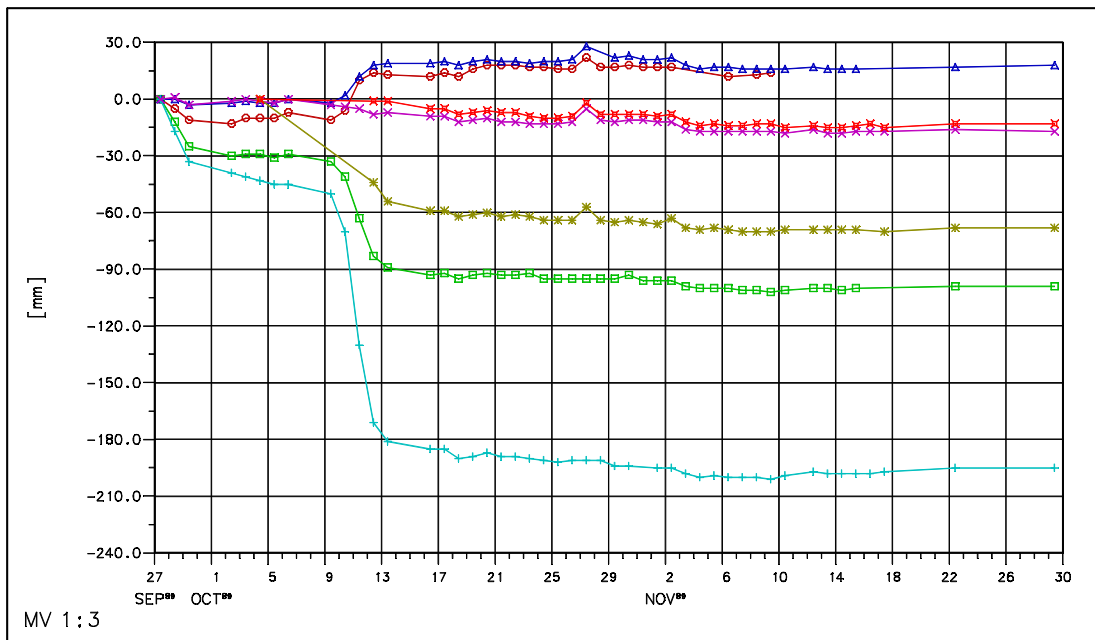


Abb. 69.5: Mittel auffällige, bis auf zwei Ausnahmen gleichgerichtete und höhengleiche Hakensystematik – Typ 1

Der Haken tritt bereits in zwei von sieben Setzungsverläufen nicht auf. Der Gewissheitsfaktor reduziert sich auf 0,79, das Auffälligkeitsmaß bleibt annähernd gleich, da es ausschließlich aus den vorhandenen Haken bestimmt wird.

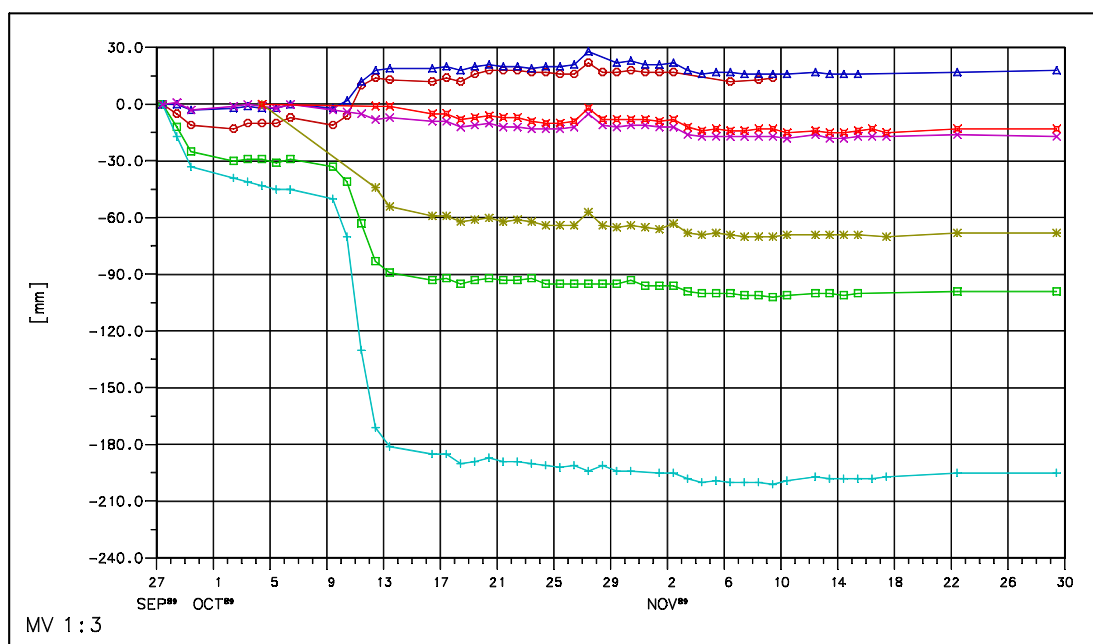


Abb. 69.6: Mittel auffällige, bis auf zwei Ausnahmen gleichgerichtete und höhengleiche Hakensystematik – Typ 2

Der Haken tritt in einem Verlauf nicht, bei einem weiteren in entgegengesetzter Richtung auf. Der CF-Wert reduziert sich noch weiter auf 0,62, das Auffälligkeitsmaß bleibt annähernd gleich.

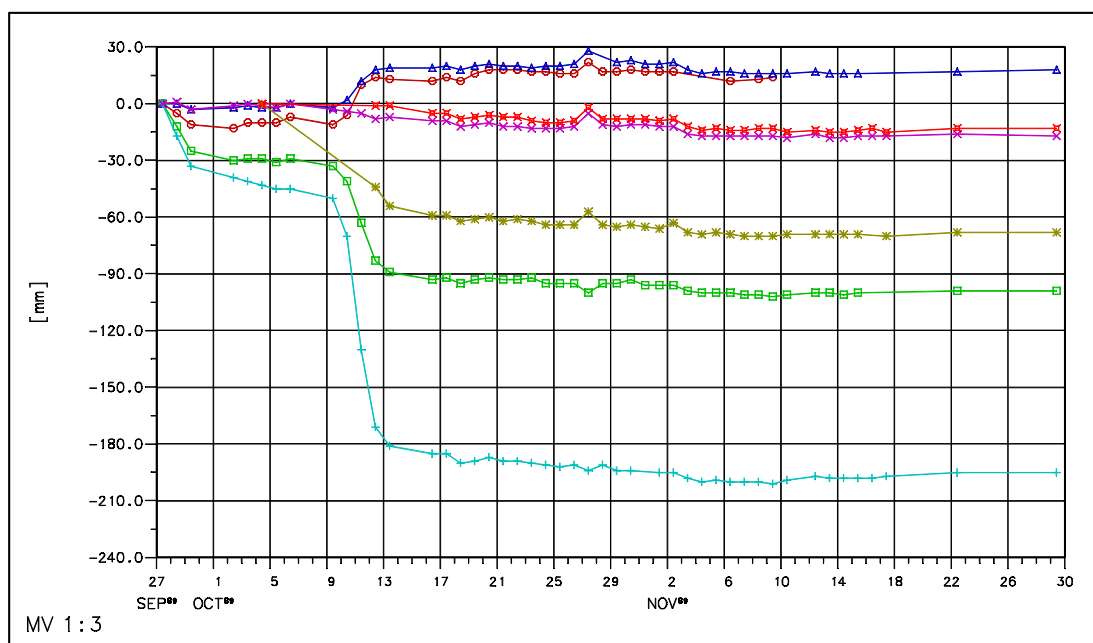


Abb. 69.7: Mittel auffällige, höhengleiche Hakensystematik in beiden Richtungen

Zwei Verläufe weisen Haken entgegengesetzter Richtung auf. Der CF-Wert wird 0,32, die Auffälligkeit bleibt immer noch annähernd unverändert. Es kann kaum mehr eine Aussage über den Fehler gemacht werden, also weder, dass er vorliegt, noch dass er nicht vorliegt.

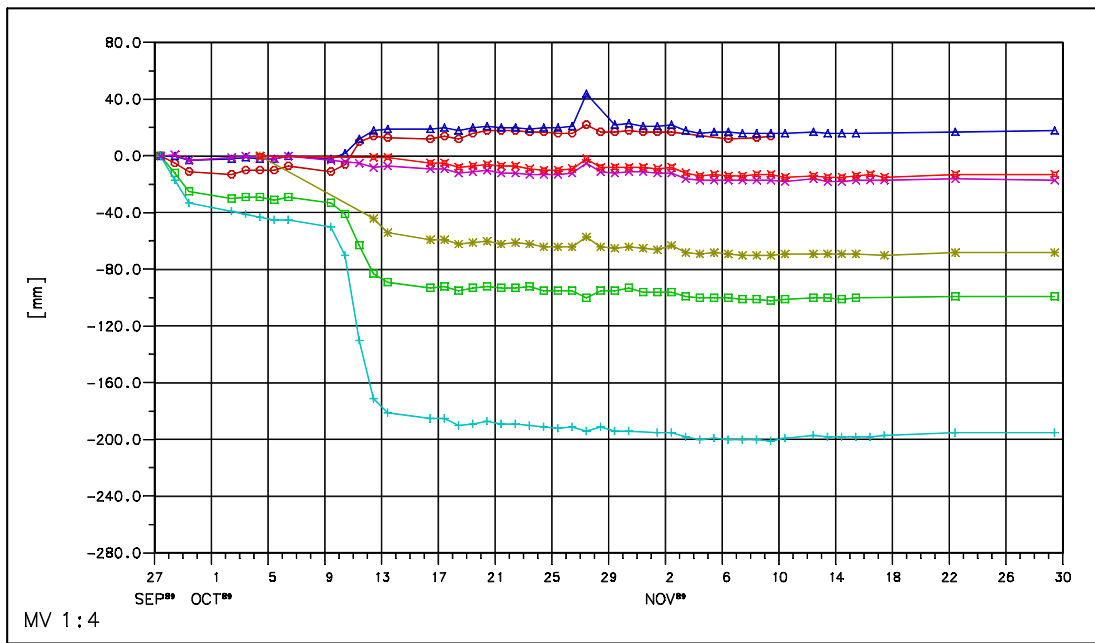


Abb. 69.8: Sehr stark auffällige, bis auf eine Ausnahme höhengleiche Hakensystematik in beiden Richtungen

Ein Setzungsverlauf weist gegenüber den anderen einen besonders hohen Haken auf, zwei einen entgegengesetzten Haken. Das Kriterium der Größengleichheit wird eklatant verletzt. Der CF-Wert wird auf $-0,23$ herabgesetzt, die Auffälligkeit mit 1,17 als sehr stark klassifiziert.

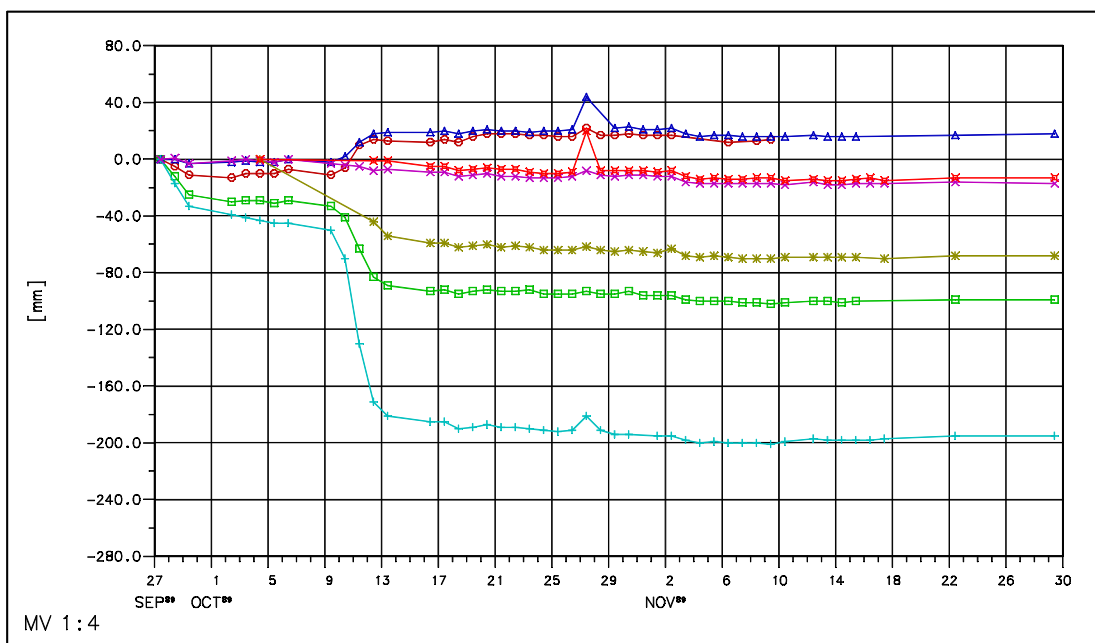


Abb. 69.9: Sehr stark auffällige, gleichgerichtete und nicht höhengleiche Hakensystematik

Alle Haken weisen in dieselbe Richtung, sind jedoch unterschiedlich hoch. Der CF-Wert wird $0,56$, die Auffälligkeit 1,32.

Nach Ansicht des Systems sind die Fälle 69.2 – 69.4 für das Vorliegen eines Standpunktsfehlers potentiell, 69.5, 69.6 und 69.9 immer noch leicht verdächtig. Über 69.7 und 69.8 kann das System keine klare Aussage machen, es liegen zwar dafürsprechende Indizien vor, aber auch Indizien, die dagegen sprechen. Diese Fälle sind dem System unklar. Insgesamt wurden - aus Sicht des Autors - die Fälle vom System durchaus zufriedenstellend gelöst, seine Parametrisierung war zielführend.

Im Anwendungsgebiet sind 50 Messungen von einem Standpunkt aus zwar selten möglich, mehr als 7 aber doch sehr häufig. Um die Ergebnisse der CF-Methode bei mehr als sieben vorhandenen Messungen einer Messepoche zu analysieren, werden die in den Abb. 69.1 - 69.9 dargestellten Messverläufe mit den Faktoren $F = 2, 3, 4, 5, 6$ und 7 multipliziert. Es wird also jeder Messverlauf als doppelt, dreifach, etc. im Datenmaterial vorhanden simuliert. Praktisch kann man sich das so vorstellen, als würden sich die Messverläufe der sieben Messpunkte in weiteren Messquerschnitten immer wiederholen. Es liegen dann insgesamt $M = 14, 21, 28, \dots, 49$ Messungen vor. Tabelle 11 zeigt die sich ergebenden CF-Werte, die Auffälligkeiten bleiben unverändert laut Tabelle 10.

Abbildung		69.1	69.2	69.3	69.4	69.5	69.6	69.7	69.8	69.9
F=2	M=14	-	0,99	0,99	0,98	0,96	0,62	0,32	-0,41	0,81
F=3	M=21	-	1,00	1,00	1,00	0,99	0,86	0,53	-0,55	0,92
F=4	M=28	-	1,00	1,00	1,00	1,00	0,95	0,68	-0,65	0,96
F=5	M=35	-	1,00	1,00	1,00	1,00	0,98	0,78	-0,73	0,98
F=6	M=42	-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,85	-0,80	0,99
F=7	M=49	-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,90	-0,84	1,00

Tabelle 11: Resultierende Certainty Factors zu den Abbildungen 69.1 – 69.9 nach systematischer Vervielfachung der Messungen

Die Fälle 69.2 - 69.5 ergeben mit wachsender Anzahl vorhandener Messverläufe sehr rasch den CF-Wert 1, da die positiven Indizien übermächtig gegenüber den, in ihrem Einfluss auch geringeren, negativen Indizien werden. 69.6 und 69.7 konvergieren langsamer, die positiven Indizien überwiegen analog, die wenigen negativen üben aber einen starken Einfluss aus. 69.8 konvergiert langsam in Richtung -1 , das System spricht sich mit wachsender Zahl von Verläufen immer stärker gegen die Fehlerhypothese aus. 69.9 strebt wieder langsam gegen den CF-Wert 1, die Haken sind zwar ungleich hoch, liegen aber in allen Verläufen in gleicher Richtung vor. Das Kriterium der Höhengleichheit wird immer weniger als relevant erachtet.

Die CF-Methode kommt nach dieser Simulation, vergleicht man die Ergebnisse der Fälle relativ miteinander, ebenfalls zu mit der Ansicht des Autors verträglichen Resultaten. Absolut gesehen zeigt sich jedoch mit wachsender Anzahl an Verläufen und speziell bei Extremfällen (69.9) eine etwas zu ausgeprägte Tendenz, gegen 1 zu konvergieren. Die gewählte Parametrisierung scheint für ein bis ca. 20 Messungen pro Messepoche geeignet, liegen erheblich mehr Messungen vor, so ist eine Verringerung der initialen, intuitiven Regel-CFs angezeigt. 69.9 zeigt in jedem Fall eine fehlerhafte Messepoche an, ob die Ursache (bei vielen derartigen Verläufen) allerdings in einem Standpunktsfehler liegt, wäre stärker zu bezweifeln, als dies das System tut. Da aber (für die Methode) keine negativen Indizien vorliegen, kommt es bei diesem in der Praxis wohl extrem seltenen Fall zu diesen zu hohen CF-Werten. Insgesamt widerspiegeln daher die Ergebnisse bis auf extreme Situationen *zuverlässig* die manuelle Expertise.

In der gegenwärtigen, prototypischen Modellierung ist die Treffsicherheit allerdings noch nicht ausreichend. Nicht jeder Standpunktsfehler manifestiert sich tatsächlich als Haken in den Verschiebungsverläufen. Die in Kap. 5.5.3, Seite 99 beschriebenen Effekte, wie z.B. gleichzeitig auftretende Deformationen oder/und andere systematische Fehler in den Ausgangsdaten könnten dies verhindern. Dennoch ist es Experten mitunter möglich, wennauch unsicher, auf diesen Fehler zu schließen. Eine komplexere Modellierung und Repräsentation des Fehlermusters wäre hierfür nötig.

Verwendungsziel der Vorgehensweise

Die Vorgehensweise ist zur heuristischen Aufdeckung eines spezifischen Fehlers in den Verschiebungsdaten anzuwenden. Ziel ist es, ausreichend auffällige und ausreichend sicher behauptbare Fehler automatisch zu erkennen, die entsprechenden Messdaten von weiteren geotechnischen Inferenzprozessen vorab auszuschließen und damit fehlerhafte Ergebnisse letzterer zu vermeiden. Das genutzte Verfahren der CF-Methode ist rechenintensiv, wodurch zur Vermeidung unverhältnismäßig langer Inferenzlaufzeiten sehr große Datenmengen in kleinere Datenpakete unterteilt werden müssen. Es ist unabhängig vom Messintervall und daher auch insbesondere für die Überwachung in kurzen Zeitabständen, automatisch erfasster Daten geeignet.

6.4 Anmerkungen zu den Tests

Im Rahmen der Tests wurden vorwiegend Daten eines konkreten Projekts, aber auch (für die CF-Methode) einige wenige, simulierte Falldaten zur Auswertung herangezogen. Die Systematik der Tests folgte dem Schema:

1. Test eines einfachen Beispiels

Erläuterung der nötigen Benutzereingaben, Diagrammanzeige der Testdaten, Anzeige und Erläuterung der Systemausgabe.

2. Test der Laufzeitperformanz

Steigerung der Testdatenmenge bzw. Variation von Eingabeparametern, Angabe der Inferenzlaufzeiten.

3. Diskussion der Zuverlässigkeit der Ergebnisse

Auflistung und Erläuterung der möglichen Fehlansagen und deren Ursachen.

4. Erläuterung des Verwendungsziels der Vorgehensweise

Angabe, wofür und unter welchen Voraussetzungen die Vorgehensweise geeignet ist.

Mit den gewählten einfachen Beispielen wurde versucht, für das Anwendungsgebiet wichtige Auswertefälle oder auch Auswertewünsche eines Experten zu simulieren.

Die Laufzeittests wurden so angelegt, dass ihre Ergebnisse signifikante Rückschlüsse auf allgemein zu erwartende Rechenzeiten bei der Bearbeitung von Tunnelprojekten unterschiedlicher Größenordnungen erlauben. Getestet wurde auf Basis der derzeit im Anwendungsgebiet typischen Projekttrandbedingungen. Für diese sind die Testergebnisse auch tatsächlich repräsentativ. Im Falle abweichender Verhältnisse wären zusätzliche praktische Tests erforderlich.

Die Zuverlässigkeit der implementierten Vorgehensweisen wurde anhand der theoretisch möglichen Fehlansagen des Systems und deren Ursachen besprochen. Dabei ist prinzipiell zu unterscheiden, ob diese dem System oder dem Benutzer anzulasten sind. Vereinzelt wurde auf sie,

soweit sie in den Tests auch tatsächlich auftraten, hingewiesen. Sie wurden jedoch nicht explizit *gesucht* oder simuliert. Um fundierte Aussagen über die Häufigkeit ihres Vorkommens sowie ihre Projektrelevanz machen zu können, wären ebenso noch weitere, ausgiebige Tests durchzuführen.

Auf die Möglichkeiten ihrer Vermeidung mittels verbesserter Modellbildungen oder durch die Repräsentation zusätzlichen Wissens wird an verschiedenen Stellen in der Arbeit – so auch im abschließenden Kapitel 7 – allgemein hingewiesen. Wie im Einzelfall die wissensbasierte *Bekämpfung* von Fehlaussagen konkret verwirklicht werden könnte und wie schwierig dies tatsächlich ist, wäre im Rahmen der Weiterentwicklung des Prototyps eigens zu untersuchen.

7. Schlussfolgerungen und Ausblick

Die bisher übliche Vorgehensweise bei der laufenden geotechnischen Beurteilung geodätischer Verschiebungsmessungen im Tunnelbau ist arbeitsintensiv und erfordert Experten, die über spezielles Fachwissen verfügen. Es existieren derzeit keine Werkzeuge, die diese verantwortungsvolle Arbeit effizient unterstützen und zu einer tatsächlichen Entlastung von Experten beitragen.

Aufgrund der fortschreitenden technischen Entwicklung, insbesondere im Bereich der Messtechnik (Stichwort: automatische Messsysteme), und der ständig steigenden Anforderungen an die Sicherheit von in Bau befindlichen Tunnelbauwerken ist davon auszugehen, dass die zu interpretierenden Datenmengen weiterhin ansteigen und speziell die Messintervalle dichter werden. Damit verbunden wächst der Bedarf an automatisierten Werkzeugen, mit dessen Hilfe die Daten nicht nur aufbereitet (berechnet, gefiltert, visualisiert), sondern auch interpretiert (bewertet, aus ihnen Schlüsse gezogen) werden können, um gegebenenfalls rasch, rechtzeitig und richtig reagieren zu können.

In dieser Arbeit ist der Prototyp eines wissensbasierten Systems entwickelt worden, der für eine Teilaufgabe ein solches Werkzeug darstellt. Er ist dafür gedacht, Auffälligkeiten in den Verschiebungen automatisch zu erkennen und diese inklusive verschiedener Zusatzinformationen (mögliche Ursachen, Maßnahmen, etc.) auszugeben. Hierfür muss er mit Expertenwissen ausgestattet werden, welches über die Benutzerschnittstelle von außen zugeführt und mit Fortdauer eines Projekts laufend geändert und erweitert werden kann. Dieses Wissen wird vom System überprüft, in interne Strukturen übersetzt und für die Problemlösung eingesetzt.

Da für die gestellte Aufgabe von unter Umständen großen Datenmengen, vollständig zu vermeidenden Benutzerinterventionen während des Analysevorgangs und vorab in Anzahl und Art unbekanntem Ergebnissen auszugehen war, wurde der regelbasierte Ansatz und eine datengetriebene Vorwärtsverkettungsstrategie gewählt. Die entwickelten Regeln wurden als feste, vom Benutzer nicht veränderliche Wissens Elemente, implementiert. Sie können jedoch entsprechend einem gewünschten Analyseziel im System aktiviert bzw. deaktiviert werden.

Kennzeichnend für die Aufgabenstellung war weiters, dass zur Problemlösung in der Hauptsache empirisches und auch viel intuitives und subjektives Wissen eingesetzt wird und die zu interpretierenden Daten oft ungenau, fehlerhaft und unvollständig sind. Aus diesem Grund wurden ausschließlich heuristische (der Entdeckung dienende) Analysemethoden in der Arbeit entwickelt. Für das Erkennen von Messfehlern wurde ein in der Wissenstechnik bekanntes Verfahren quantitativen, unsicheren Schließens adaptiert.

Die Methoden wurden im Prototyp unter Verwendung der Expertensystem-Entwicklungsumgebung CLIPS und zweier Zusatzmodule (wxCLIPS, FuzzyClips) implementiert. Zur Repräsentation und Anwendung von Wissen dienen zufolge der Möglichkeiten dieses Programms ausschließlich Fakten, Regeln und Prozeduren.

Die durchgeführten Systemtests haben gezeigt, dass der Prototyp im Bereich der Laufzeiteffizienz der Wissensverarbeitung (Datenübernahme-, Datenvorverarbeitungs-, Inferenzlauf-, Ergebnisausgabezeiten) den derzeitigen wie auch den oben erwähnten zukünftigen Anforderungen im Anwendungsgebiet gerecht werden kann, sofern größere Messdatenmengen in kleinere Einheiten aufgeteilt und sequentiell analysiert werden. Es ist hierfür denkbar, diese Unterteilung im System nach gewissen Vorgaben (z.B. nach Tunnel- oder Zeitbereichen) zu automatisieren.

Die Vorkonfiguration des Prototyps (Eingabe von Wissensteilen in diversen Textdateien, Setzen globaler Programmparameter in diversen Menüs) setzt explizit Experten- sowie Projektwissen voraus und ist mit einem gewissen Arbeitsaufwand verbunden. Diese Schnittstellen sind nach kurzer Einschulung jedoch jedem Experten sofort verständlich. Die in Berichtsform erstellten Ausgaben sind klar strukturiert und auch einem Benutzer geringerer fachlicher Qualifikation begreiflich.

Das Leistungsspektrum des Systems wird bestimmt durch die Menge des vorhandenen und eingegebenen Projektwissens. Je mehr Wissen über das Anwendungsgebiet und konkret über ein zu bearbeitendes Tunnelprojekt im System vorhanden ist, desto mehr Analysen sind dem System möglich. Mit den implementierten Regeln sind gegenwärtig einige der als besonders wesentlich erachteten Analysen ausführbar. Konkret sind dies das Erkennen von Geschwindigkeitszunahmen von Verschiebungen und ihres Zusammenhangs mit dem Baufortschritt sowie das Erkennen auffälliger, zeitlicher Entwicklungen absoluter oder relativer Verschiebungen, Verschiebungsdifferenzen benachbarter Punkte und Verschiebungsvektoren im Messquerschnitt. Aufgrund des modularen Systemaufbaus ist mittels zusätzlicher Regeln und geeigneter Faktenrepräsentationen von Erwartungen oder Prognosen eine Erweiterung des Leistungsspektrums programmtechnisch einfach zu bewerkstelligen (z.B. die Beurteilung von Verschiebungsverhältnissen). Ebenso möglich und sinnvoll wären gewisse konzeptionelle Verfeinerungen des Systems, da derzeit beispielsweise nicht beachtet wird, dass die Beschreibung erwarteter Verschiebungsverläufe mittels einzelner mathematisch definierter Funktionen oder Vektoren in der Regel nicht ausreicht. So müsste korrekterweise zur Berücksichtigung nachfolgender Bauphasen ein erwarteter Verschiebungsverlauf bereits aus der Summe mehrerer Funktionen beschrieben werden, um beispielsweise den erwarteten, später einsetzenden Setzungszuwachs zufolge eines Strossenvortriebs ebenfalls repräsentieren zu können. Das System könnte aber derart erweitert werden, dass anhand der Baufortschrittsdaten eine Änderung der Bauphasensituation automatisch erkannt wird. Die einzelnen Funktionen könnten (falls diese vorhanden sind) daraufhin entweder automatisch summiert werden oder die Analyse auch nur für den jeweils gültigen Zeitraum der Funktionen vorgenommen und dann abgebrochen werden.

Die Treffsicherheit des Erkennens von Auffälligkeiten ist primär von der Korrektheit des eingegebenen Expertenwissens, was, wann, wo und in welchem Ausmaß vorab als auffällig erachtet wird und in zweiter Linie von der Qualität der Messdaten und der Wahl gewisser Systemparameter abhängig. Möglicherweise fehlerhafte Messdaten werden im Konzept des Prototyps insofern berücksichtigt, als über sie keinerlei geotechnisch relevante Aussagen getroffen werden. Ihr Erkennen ist somit den geotechnischen Analysen vorangestellt. Als Erkennungsmethode ist hierfür ein heuristisches Verfahren unsicheren Schließens implementiert. Der Test dieses Verfahrens anhand simulierter Daten zeigt für ein im Anwendungsgebiet charakteristisches Fehlerbeispiel (Standpunktfehler) zufriedenstellende Ergebnisse bei einfachen Fällen. Zur Behandlung schwieriger Fälle ist die Fehlermodellierung im Prototyp jedoch noch nicht ausreichend und zur Verbesserung des Verfahrens eine komplexere Modellbildung erforderlich.

Die möglichen weiteren Ursachen fehlerhafter Analyseergebnisse werden in der Arbeit angeführt. Auf sie wird in den Ausgaben des Prototyps hingewiesen. Um diese soweit als möglich zu vermeiden, wäre der Prototyp ebenfalls noch weiter zu verfeinern. Komplexere Prozeduren und Modelle, Regeln zur Behandlung von Ausnahmefällen, etc. wären zu integrieren.

Das System wurde aus Akzeptanzgründen so konzipiert, dass der Benutzer sein Verhalten weitgehend kontrollieren kann. Er legt die Analyseziele fest und konfiguriert die räumliche und zeitliche Erstreckung der zu analysierenden Daten.

Die Lösungsfindung ist in dieser Hinsicht - obwohl datengetrieben – dennoch zielgerichtet. Aufgrund der abrufbaren Erklärungstexte ist sie auch transparent. Das System bevormundet den Benutzer nicht, d.h., kein die Ergebnisse beeinflussender Parameter ist fest codiert. Vielmehr werden sinnvolle Werte vorgeschlagen, die bestätigt oder abgeändert werden müssen. Auf diese Weise stellt das System sicher, dass seine Konfiguration bewusst und überlegt vorgenommen wurde. Finden sich dennoch eklatante Widersprüche im eingegebenen Wissen, wird auf diese hingewiesen, die Eingaben werden jedoch nicht verändert.

Für einen tatsächlichen Einsatz als Überwachungssystem müsste der Prototyp zudem noch um relevante Funktionalitäten im Ausgabebereich erweitert werden (z.B. Alarmierungen). Verbesserungen im Bereich der Erklärungskomponente wären durch Visualisierungen (z.B. der erwarteten Verschiebungsfunktionen) zu erzielen.

In seiner Konzeption wird eine wissensbasierte Verarbeitung faktenrepräsentierter, sekundärer Ausgangsdaten im Sinne einer echten Inferenz derzeit nur für wenige Problemfälle vorgenommen. Hinsichtlich der Art und Weise direkter Nutzung sekundärer Daten im Inferenzprozess sind aber verschiedene weitere Möglichkeiten denkbar. Einige - mitunter visionäre -, die zu einer sinnvollen Erweiterung des erstellten Prototyps führen könnten, seien angeführt:

- **Kontrolle der vom Benutzer eingegebenen, erwarteten Verschiebungen**

Werden beispielsweise für zwei Messpunkte gleiche Verschiebungsverläufe als *erwartet* spezifiziert, so können die Sekundärdaten dazu genutzt werden, diese Eingabe zu überprüfen. Sind z.B. die Geometrien der Regelquerschnitte im Bereich der Punkte stark verschieden, so ist die Eingabe unter Umständen nicht plausibel und sollte nochmals überdacht werden. Eventuell wurde diese Verschiedenheit der Sekundärdaten übersehen. Derartige Prüfungen können mittels Regeln formuliert werden. Es kann hierfür auch wieder eine empirische Bewertung von Sekundärdaten zweckmäßig sein.

- **Herleitung zu erwartender Verschiebungen**

Für das Bilden einer Apriori-Vorstellung über zu erwartende Verschiebungsverläufe (Normalverhalten) sind eine Reihe sekundärer Daten ausschlaggebend (Regelquerschnittsform, -größe und -unterteilung, geologische und gebirgsmechanische Kennwerte, Vortriebsart und -geschwindigkeit, Stützmitteleinsatz, etc.). Liegen die Verschiebungsverläufe der ersten Messpunkte vor, so werden sie gemeinsam mit den Sekundärdaten für die Festlegung eines *neuen* Normalverhaltens der Verschiebungen weiterer Messpunkte genutzt - quasi ein dynamisches update der Vorstellung. Es sind daher zwei Fälle zu unterscheiden:

1. Die Ableitung eines erwarteten Verschiebungsverlaufs ausschließlich aus den Sekundärdaten.
2. Die Ableitung eines erwarteten Verschiebungsverlaufs aus Sekundärdaten und bereits vorhandenen Messergebnissen.

Für den ersten Fall stehen im Anwendungsgebiet mathematische Methoden zur Verfügung (Kap. 5.5.2). Eine direkte Integration des prozeduralen Wissens dieser Methoden in ein wissensbasiertes System erscheint nicht zweckmäßig. Vorstellbar wäre allerdings eine von Regeln gesteuerte Übergabe von Sekundärdaten an und die Übernahme von Berechnungsergebnissen aus entsprechenden Programmen. Geeignete Schnittstellen wären zu definieren. Für eine empirische Methode zur Ableitung spricht, dass nicht unbedingt alle Sekundärdaten vorliegen müssten, um zu einem (wenn auch unsicheren) Ergebnis zu kommen.

Wie diese Methode aussehen könnte und ob die Ergebnisse mit der Auffassung eines menschlichen Experten vereinbar wären, müsste erst erforscht werden.

Für den zweiten Fall könnten prinzipiell die in Kap. 5.5.3 erwähnten empirischen Funktionen herangezogen werden. Es tritt allerdings das Problem auf, dass für deren Übertragbarkeit auf andere Messpunkte ähnliche äußere Bedingungen vorherrschen müssen. Von Vorteil wäre, dass nicht unbedingt Messdaten des vorliegenden Projekts nötig wären. Es könnten prinzipiell auch Daten anderer Projekte verwendbar sein. Falls allerdings die Ähnlichkeit der äußeren Bedingungen, wie auch immer diese beschrieben werden kann, nun nicht oder schlecht erfüllt ist, müsste entweder der quantitative Einfluss der *Unähnlichkeit* der Bedingungen auf die Funktionen irgendwie ermittelt oder dieser Lösungsweg aufgegeben werden. Ob für die erste Möglichkeit taugliche Verfahren derzeit existieren oder entwickelt werden könnten, bleibe dahingestellt.

Eine praktische Lösung für beide Fälle bestünde im Aufbau einer Bibliothek von einerseits mathematisch berechneten und andererseits tatsächlichen, als normal zu bewertenden Verschiebungsverläufen (eventuell auch mitsamt der Bewertungsparameter) und zugeordneten Sekundärdaten, aus denen der Experte auswählen bzw. sich eine eigene *Erwartung* erarbeiten kann.

- **Konsistenzprüfung der aufgetretenen Auffälligkeiten in den Verschiebungen**

Aus dem Bereich der Sekundärdaten kommen hierfür insbesondere die Ergebnisse anderer, nicht geodätischer Überwachungsmessungen in Betracht (Kap.4.1.2, Seite 50). Ergeben sich aus diesen abweichende oder gar gegensätzliche Interpretationen als aus den Verschiebungsdaten, so ist das Verformungsbild *inkonsistent*. Das Vorliegen solcher *Ungereimtheiten* tritt in der Praxis oftmals auf und kann nicht immer zufriedenstellend erklärt werden. Erkennen und Behandeln des Problems durch einen Experten (und umso mehr durch ein wissensbasiertes System) ist schon allein deshalb schwierig, weil unterschiedliche Messgrößen vorliegen können (Gebirgsdruck, Ankerkraft,...), deren Interpretation für sich schon wieder ein eigenes Wissensgebiet darstellt. Eine gewisse Umgehung dieser Schwierigkeit wäre, wenn im Ausgabebericht zu den erkannten Auffälligkeiten ein Hinweis (link) auf derartige Sekundärdaten beigelegt würde. Der Benutzer kann dann diese anfordern, ihre Interpretation vornehmen und eventuelle Ungereimtheiten erkennen. Zu klären wäre noch die Frage, nach welchen Kriterien diese Daten zuzuordnen wären. Innerhalb welchen Abstands macht es beispielsweise noch Sinn, die Messergebnisse einer Gebirgsdruckdose mit den Verschiebungen eines Messpunktes in Zusammenhang zu bringen? Hat es einen Sinn, dies zu tun, wenn sie schon längere Zeit nicht mehr gemessen wurde? Diese Entscheidungen müssten jedoch nicht automatisiert werden. Das System könnte so ausgelegt werden, dass der Benutzer selbst diese Zuordnung konfigurieren kann.

Da in der vorliegenden Arbeit Auffälligkeiten ausschließlich aus den Verschiebungen ermittelt werden, ist der umgekehrte Fall, dass diese unauffällig sind, obwohl andere Messungen (Sekundärdaten) das Gegenteil zeigen, darin nicht behandelt.

- **Erkennen bautechnisch relevanter Auffälligkeiten**

Eine direkte Nutzung sekundärer Daten ist für den in Kap. 4.4 erwähnten Analyseaspekt der Beurteilung eines Über- bzw. Unterprofils möglich. Aus der Geometrie des Regelquerschnitts für den Ausbruch und den aufgetretenen Verschiebungen (der augenblicklichen Absolutlage der Messpunkte) lässt sich für jeden Messpunkt sein Abstand zum Sollprofil ermitteln. Dieser kennzeichnet zunächst den momentanen Status des Über- bzw. Unterprofils. Unter Verwendung empirischer Funktionen zur Repräsentation des Wissens über den

weiteren Verlauf von Verschiebungen (Seite 92) kann jedoch auch abgeschätzt werden, wie sich der Abstand weiterhin entwickeln wird. Ob, wann, wo und in welchem Ausmaß Unterprofil droht, kann, wenn entsprechendes Wissen vorliegt, inferenziert werden. Diese Aufgabenstellung wäre im Grunde auch rein prozedural lösbar. Sie kann aber anhand von Regeln, Fakten und Prozeduren wesentlich klarer und einfacher formuliert werden. Mittels Repräsentation von Bewertungswissen kann die Situation qualitativ beurteilt werden (*Bei Messpunkt X ist das Unterprofil bereits sehr groß/ wird womöglich sehr groß werden*).

In Repräsentation und Lösung besonders schwierig werden jene Probleme erachtet, die sich einem Experten erst nach dem Vorliegen von Auffälligkeiten stellen. Diese sind:

- **Herleitung möglicher Ursachen von Auffälligkeiten**

Werden Auffälligkeiten erkannt, so ist nach ihren Ursachen zu forschen. Mit der Art der Auffälligkeit ist quasi ein Symptom gegeben, welches auf eine Ursache hinweist. Für die direkte Lösung solcher empirisch-diagnostischer Aufgabenstellungen existieren wissensbasierte Konzepte und Systeme, welche aber vorwiegend in anderen Gebieten – so vor allem im medizinischen Bereich – erprobt sind. Ihre Tauglichkeit für den Tunnelbau wäre erst zu untersuchen.

- **Herleitung möglicher wirksamer Gegenmaßnahmen bei Auffälligkeiten**

Werden Ursachen ausgemacht oder vermutet, so ist zu reagieren. Je nach Art der Auffälligkeit und Ursache werden verschiedene Maßnahmen sinnvoll und im Rahmen eines Projekts auch praktisch realisierbar sein. Ein wissensbasiertes, automatisches Ableiten einer optimalen Maßnahme ist ein komplexes Problem. Einfacher realisierbar erscheint wiederum die Bereitstellung einer Liste grundsätzlich möglicher Maßnahmen bezüglich bestimmter Probleme, die den Experten in seiner Entscheidung unterstützt. Ebenso für das oben beschriebene Erkennen von Ursachen wäre dies ein möglicher Ansatz.

Ein Versuch, diese beiden Aufgabenstellungen vollständig automatisch zu lösen, bedeutet jedenfalls ein tiefes Eindringen in die Kernkompetenzen von Experten. Die Tragweite möglicher Fehlentscheidungen eines für diese Aufgaben konzipierten Systems, ist, würde es keine übergeordnete menschliche Kontrolle erfahren, kaum abschätzbar. Seine Akzeptanz wäre daher aus derzeitiger Sicht äußerst fraglich.

Bei dem aus dieser Arbeit hervorgehenden Prototyp tritt dieses Problem nicht auf. Er erfüllt den beabsichtigten Verwendungszweck eines reinen Unterstützungswerkzeugs, welches - ab einer entsprechenden Datenmenge - Ergebnisse schneller ermittelt und dokumentiert als dies nach der bisherigen manuellen Arbeitsweise einem Experten möglich ist. Zuverlässiger sind die Ergebnisse mit Sicherheit in der Hinsicht, als ein Übersehen von Sachverhalten, wie dies bei der Arbeit mit Diagrammen aufgrund von Darstellungsproblematiken (grafische Überdeckungen aufgrund der Datendichte, unterschiedlich starke Verformungen, die innerhalb eines Diagramms in gleichem Maßstab dargestellt werden müssen, ...) auftreten kann, generell nicht vorkommt. Das Zuverlässigkeitsniveau eines echten Experten wird aber, außer in diesem Punkt, noch auf lange Sicht unerreichbar bleiben. Die Ergebnisse des konzipierten Systems stellen für den Experten in der Regel keine Endergebnisse dar, sondern sind Ausgangspunkt weiterer Interpretationen, wodurch sie in einen redundanten Entscheidungsprozess eingebettet sind und eine Kontrolle erfahren.

Literaturverzeichnis nach Themenbereichen

Themenbereich geodätisch- geotechnische Auswerte- und Analysetechniken bzw. –systeme von Verschiebungsmessungen im Tunnelbau

- [1] *Brandl, H.* (1999): Bauen im Fels. Arbeitsunterlagen zur gleichn. Vorlesung. TU Wien
- [2] *Brandstätter G., Brunner F.K., Schelling G. (Hrsg.)* (1996): Kurs für Ingenieurvermessung 96. Tagungsband 1+2, Dümmler Verlag
insb. Beiträge A 2, A 9, E 6, E 7
- [3] *Deutsche Gesellschaft f. Geotechnik*(1995): Empfehlungen des Arbeitskreises Tunnelbau., Verlag Ernst&Sohn
- [4] *Deutscher Verein für Vermessungswesen (Hrsg.)* (1998): Hybride Vermessungssysteme –Grundlagen und Anwendungen-. Beiträge zum 44. DVW-Seminar der Universität der Bundeswehr München. Verlag wittwer
insb. Beiträge S.109, S.151
- [5] *Furtmüller G. et al* (1999): Auswertung geologisch-geotechnischer Tunnelbaudaten mittels dreidimensionaler Modellierung. Mitteilungen für Ingenieurgeologie und Geomechanik. TU Wien. Band 2
- [6] *Gattermann J., Stahlhut O. (eds)* (1998): Messen in der Geotechnik. Tagungsband Fachseminar Braunschweig
insb. Beiträge S.157, 313
- [7] *Golser H., Steindorfer A.* (2000): Displacement Vector Orientations in Tunnelling –What do they tell? Felsbau 18 Vol. 2/2000
- [8] *Gruen A., Kahmen H. (eds)* (1995): Optical 3-D Measurement Techniques III. Proc. Conf. Vienna 1995.
insb. Beiträge S.119, 222
- [9] *Heim N., Rabensteiner K.* (1995): Zusammenspiel Geologie/Meßtechnik am Beispiel des Sonnbergtunnels. Felsbau 13 Vol. 3/95
- [10] *Kahmen H., Brückl E., Wunderlich T. (eds)* (1998): Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering. Proc. Symposium Eisenstadt
insb. Beiträge S.15, 28, 46
- [11] *Liu Q., Brosch F.J., Klima K., Riedmüller G.* (1997): Evaluation of data during tunnelling using an expert system. Proc. World Tunnel Congress '97. Vienna
- [12] *Liu Q., Brosch F.J., Klima K., Riedmüller G., Schubert W.* (1999): Application of a Data Base System During Tunnelling. Felsbau 17 Vol.1/99
- [13] *Möller G.* (1998): Geotechnik. Werner Verlag
- [14] *Müller, L., Fecker, E.* (1978): Grundgedanken und Grundsätze der ‚Neuen Österreichischen Tunnelbauweise‘. Clausthal, Trans Tech Publications
- [15] *Müller, L.* (1978): Der Felsbau. 3.Band, Tunnelbau, Stuttgart. Ferdinand Enke Verlag
- [16] *Purrer W., John M.* (1994): Standortbestimmung der geotechnischen Messungen im Tunnelbau. Felsbau Vol. 5/94

-
- [17] *Reik G., Paehge W. (eds)* (1997): Raumbezogene Informationssysteme für geologische, bau- und geotechnische Aufgaben. Tagungsband FIS-Forum Clausthal
insb. Beiträge S. 57, 67, 87, 135
- [18] *Rabensteiner K.* (1996): Advanced tunnel surveying and monitoring. Felsbau 14 Vol. 2/96
- [19] *Schubert P.* (1995): Funktion und Grenzen der Geotechnischen Messungen im Tunnelbau. Felsbau 13 Vol. 6/95
- [20] *Schubert W.* (1993): Erfahrungen bei der Durchörterung einer Großstörung im Inntaltunnel. Felsbau 11 Vol. 6/93
- [21] *Schubert, W., Steindorfer, A., Vavrovsky, G.* (1996): Tunnelbau im Untertagebau. I.. Auswertung und Interpretation von Verschiebungsmessdaten. Tunnelbau, Essen. Verlag Glückauf
- [22] *Schubert W., Vavrovsky G.M.* (1994): Interpretation of Monitoring Results. World Tunnelling. Nov.1994
- [23] *Schubert, W.* (1999): Grundlagen der New Austrian Tunnelling Method. Vorlesungsunterlagen. TU Graz
- [24] *Schnädelbach K., Schilcher M.* (Hrsg.) (2000): Ingenieurvermessung 2000. Beiträge zum 13. Int. Kurs f. Ingenieurvermessung. TU München. Verlag wittwer
insb. Beiträge S.102, 346
- [25] *de Souza E., Choquet P.* (1996): TRI-SYS - a 3D rock displacement monitoring system. CIM Bulletin 89(1004), S.54-57
- [26] *Stanek V., Kopacik A. (eds)* (1998): INGENIO 98. Proc. of the 1st Int. Conf. on Eng. Surveying. Bratislava
insb. Beiträge S.183, 213
- [27] *Steindorfer A., Schubert W.* (1997): Application of new methods of monitoring data analysis for short term prediction in tunnelling. Tunnels for People. Vol.I, Balkema Rotterdam
- [28] *Steindorfer A., Schubert W., Rabensteiner K.* (1995): Problemorientierte Auswertung geotechnischer Messungen. Felsbau 13 Vol. 6/95
- [29] *Steindorfer A., Schubert W.* (1997): Selective Displacement Monitoring during Tunnel Excavation. Felsbau 14 Vol. 2/96
- [30] *Vavrovsky G.M.* (1994): Gebirgsdruckentwicklung, Hohlraumverformung und Ausbaudimensionierung. Felsbau 12 Vol. 5/94
- [31] *Vavrovsky G.M., Schubert P.* (1995): Advanced analysis of monitored displacements opens a new field to continuously understand and control the geotechnical behaviour of tunnels. Proc. 8th Int. Congr. on Rock Mechanics, Tokyo, Vol.III, Balkema Rotterdam
- [32] *Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.)* (1999): Moderne Sensorik für die Bauvermessung. Tagung Duisburg. VDI-Bericht Nr. 1454
insb. Beiträge S.155, 185, 283, 315
- [33] *Verruijt A., Booker J.R.* (1996): Surface settlements due to deformation of a tunnel in an elastic half plane. Geotechnique 46(4), S. 753-756
- [34] *Voringer J.* (1994): Beitrag zur Prognose von Deformationen im Tunnelbau. Diplomarbeit. Inst. f. Felsmechanik und Tunnelbau. TU-Graz
- [35] *Weithe G.* (1999): DIBIT – Neues Profilmesssystem für den Tunnelbau. Der Vermessungsingenieur, Nr. 4/99

- [36] *Zachov R., Vavrovsky G.M.* (1995): Abschätzung der Auslastung des Spritzbetons mit Hilfe geotechnischer Messungen. *Felsbau* 13 Vol. 6/95
- [37] Unterlagen, Firmen- und Produktprospekte von Geodata ZT GmbH, Geoconsult ZT GmbH, IGT, ILF, Tunnel Consult, Leica Geosystems, Spectra Precision, Zeiss, Solexperts AG, HLAG, PAT, ÖGG, ÖIAV

Themenbereich Expertensysteme, Wissensbasierte Systeme, Methoden der Künstl. Intelligenz für geotechnische, geodätische und verwandte Anwendungen

- [38] *Bernardi E., Sardinha, PRC* (1993): Concept and practice of expert systems in civil engineering. Applications of Artificial Intelligence in Engineering VIII. Eighth International Conference. Comput. Mech. Publications, Southampton, UK; Vol. 2, 417-428.
- [39] *Benning, W.* (1991): Expertensysteme – Sachstand und Bewertung. VR 53/2
- [40] *Brezing, A.* (2000): Entwicklung eines Expertensystems zur wissensbasierten Deformationsanalyse. Dissertation. RWTH Aachen
- [41] *Brauner M., Ganahl E.* (1999): GIS-basiertes Expertensystem zur Risikobewertung von Hanggleitungen in Wildbacheinzugsgebieten. *Österr. Zeitschrift f. Verm. und Geoinf.*, Heft 2+3/1999.
- [42] *Brewka, G.* (1999): Wissensbasierte Systeme. Skriptum zur gleichn. Vorlesung, TU Wien
- [43] *Chou, S.A., Ka, H.-C., Wang J.* (1999): A knowledge-based system for preliminary tunnel support design. Artificial Intelligence Applications in Civil and Structural Engineering. Civil-Comp Press, Edinburgh, UK; 1999; iv+157 pp, 1-5.
- [44] *Chouicha M.A., Siller T.J.* (1994): An expert system approach to liquefaction analysis. 1. Development and implementation. *Computers-and-Geotechnics*, 16(1), 1-35.
- [45] *Chouicha M.A., Siller T.J., Charlie W.A.* (1994): An expert system approach to liquefaction analysis. 2. Evaluation. *Computers-and-Geotechnics*, 16(1), 37-69.
- [46] *Curth, Bölscher, Raschke* (1991): Entwicklung von Expertensystemen. Carl Hanser Verlag
- [47] *Davey-Wilson, I.E.* (1993): Evaluation of artificial intelligence and hypertext approaches to a geotechnical expert system. Information Technology for Civil and Structural Engineers. Civil-Comp Press, Edinburgh
- [48] *Davey-Wilson, I.E.* (1991): Geotechnical laboratory test simulation using AI techniques. Artificial Intelligence and Civil Engineering. Civil-Comp Press, Edinburgh
- [49] *Doll H. et al* (1995): Projekt: Wissensbasiertes System "Meßtechnik im Bauwesen", Endbericht Curt-Risch-Institut. Geod. Inst., Inst. f. Informatik, Univ. Hannover.
- [50] *Egly U., Eiter T., Tompits H.* (2000): Wissensbasierte Systeme. Skriptum zur gleichn. Lehrveranstaltung. TU Wien
- [51] *Faure R.M., Mascarelli D., Zelfani M., Charveriat L., Gandar J., Mosuro O.* (1991): XPENT: an expert system for slope stability. Artificial Intelligence and Civil Engineering. Civil-Comp Press, Edinburgh
- [52] *Feng X. and Lin Y.* (1993): Rock mechanics and expert system, Liaoning Scientific Publishers (1993) June
- [53] *Fung H.T., Kay J.N.* (1996): Development of a knowledge-based system for planning soil exploration programmes using a probabilistic approach. Information Processing in Civil and Structural Engineering Design. Civil-Comp Press, Edinburgh

-
- [54] *Giarratano J. C.* (1994): CLIPS User's Guide
- [55] *Giolas A., Toll D.G.* (1999): A knowledge-based system for correlations using object hierarchies. *Computers and Geotechnics*, 25(3)
- [56] *Harada M., Igarashi Z.-I., Ichihara Y., Okuide S., Tanabe H.* (1992): Shield tunnel planning expert system. *Hitachi Review* 41(1), 25-30. ISSN:0018-277X
- [57] *Heine K.* (1999): Beschreibung von Deformationsprozessen durch Volterra- und Fuzzy-Modelle sowie Neuronale Netze. Deutsche Geodät. Kommission, Reihe C, Nr.516
- [58] *Hudson J.A.* (1997): Practicalities of Measuring Rock Properties in Tunnels. *Felsbau* 15 Vol. 3/97
- [59] *Ichikawa Y., Aydan O., Kyoya T., Osaka H., Kawamoto T.* (1990): Expert system for tunnel design. *Microcomputers in Civil Engineering* 5(1)
- [60] *Izadi M., Puzenat Y., Chambon R., Flavigny E.* (1995): An expert system for the design of shallow foundations. *Developments in Artificial Intelligence for Civil and Structural Engineering*. Civil-Comp Press, Edinburgh
- [61] *Karbach, W., Linster, M.*(1990): Wissensakquisition für Expertensysteme. Carl Hanser Verlag
- [62] *Kalamaras G.S.* (1997): Computer-based system for supporting decisions for tunneling in rock under conditions of uncertainty. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 34(3-4)
- [63] *Kim C.Y., Bae G.J., Hong S.W., Moon H.K., Oh M.K.* (1999): Neural network expert system developed for predicting the ground settlement and the damage assessment of adjacent structures due to tunnel excavation. *Proceedings of the 9th International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE-99)*, Vol. 1, 514-520. *Knowledge Based Systems for Civil and Structural Engineering*. Civil-Comp Press, Edinburgh
- [64] *Kuhlmann H., Schütze M.* (1995): Expertensysteme in der Geodäsie – Erfahrungen aus einem Projekt. *ZfV*, H. 4,1995, S.133-143
- [65] *Lin Yunmei, Feng Xiating* (1992): An expert system for the design of surrounding rock support system in mine entries. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 11(3):243-253
- [66] *Lin Yunmei, Feng Xiating* (1993): Expert system for rock mechanics and engineering. Liaoning Science and Technology Publisher, 1993.6
- [67] *Lusti, M.*(1990): Wissensbasierte Systeme: Algorithmen, Datenstrukturen und Werkzeuge. Reihe Informatik, Band 77, Wissenschaftsverlag
- [68] *Morgenstern D., Averdung C.* (1998): SupportGIS – ein Bekenntnis zur objektorientierten Modellierung und regelbasierten Wissensrepräsentation. AVN 10
- [69] *Moula M., Toll D.G.* (1993): Representing geotechnical knowledge: soils and field tests. *Knowledge Based Systems for Civil and Structural Engineering*. Civil-Comp Press, Edinburgh, UK; 1993; vi+325 pp, 171-82.
- [70] *Moula M., Toll D.G., Vaptismas N.* (1996): Knowledge-based systems in geotechnical engineering, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Volume 33, Issue 3, April 1996
- [71] *Nanda A., Kumar S.* (1993): Title: Integrated computer aided foundation design. *Developments in Civil and Construction Engineering Computing*. Civil-Comp Press, Edinburgh
- [72] *Oliver A.J., Toll D.G.* (1995): An object-oriented approach to site investigation data management and interpretation. *Developments in Artificial Intelligence for Civil and Structural Engineering*. Civil-Comp Press, Edinburgh

-
- [73] *Poisel R. et al.* (1999): Rock Mass Rating based on Tunnel Boring Machine Data. Felsbau 17 Vol. 3/99
- [74] *Puppe, F.* (1991): Einführung in Expertensysteme. Studienreihe Informatik, Springer Verlag
- [75] *Rowlinson S.* (1993): Knowledge acquisition and representation in the geotechnical design domain-a case study.
- [76] *Sellner P.J., Steindorfer A.* (2000): Prediction of Displacements in Tunnelling. Felsbau 18 Vol. 2/2000.
- [77] *Smart J.* (1997): User Manual for wxCLIPS 1.64.
- [78] *Smith I., Oliver A., Oliphant J.* (1998): WallAid: a knowledge-based system for the selection of earth retaining walls. Tasks and Methods in Applied Artificial Intelligence. In: Proceedings 11th International Conference on Industrial and Engineering Applications of Artificial Intelligence and Expert Systems (IEA-98-AIE), Vol. 2, 888-895. Springer-Verlag, Berlin
- [79] *Toll D.G., Giolas A.* (1995): A knowledge-based system for estimation of geotechnical properties. Developments in Artificial Intelligence for Civil and Structural Engineering. Civil-Comp Press, Edinburgh
- [80] *Toll D.G., Giolas A.* (1998): Representing geotechnical properties in a knowledge-based system. Advances-in-Engineering-Software, 29(7-9
- [81] *Toll D.G., Moula M., Vaptismas N.* (1991): Representing the engineering description of soils in knowledge based systems. Applications of Artificial Intelligence in Engineering VI, 847-56. Elsevier Applied Science, London
- [82] *Trappl, R. u.a.* (1999): Konzepte der Artificial Intelligence. Skriptum zur gleichn. Vorlesung, TU-Wien
- [83] *Vaptismas R., Toll D.G.* (1993): Interpreting borehole information. Knowledge Based Systems for Civil and Structural Engineering. Civil-Comp Press, Edinburgh
- [84] *Wislocki, A.P., Bentley S.P.* (1991): An expert system for landslide hazard and risk assessment. Computers-and-Structures, 40(1), 169-72
- [85] *Wong K.C., Poulos H.G., Thorne C.P.* (1989): Site classification by expert systems. Computers and Geotechnics, 8(2), 133-56
- [86] *Zettler A.H., Poisel R., Stadler G.* (1996): Bewertung geologisch-geotechnischer Risiken mit Hilfe von Fuzzy-Logik und Expertensystemen. Felsbau 14 Vol. 6/96
- [87] *Zhang Q., Tian S., Mo Y., Dong X., Hao S.* (1993): Expert system for prediction of Karst disaster in excavation of tunnels or underground structures through a carbonate rock area. Tunnelling and Underground Space Technology 8(3)

Homepages

Fa. NEXUS Gesellschaft für wissensverarbeitende Systeme: <http://www.nexus.de>

Fa. Harlequin: <http://www.harlequin.com>

Fa. Franz Inc.: <http://www.franz.com>

Inst. f. Information Technology: <http://www.iit.nrc.ca>

Lebenslauf

- 4.1.1967 Geboren in Krems/Niederösterreich, als Sohn des Helmut und der Josefine Chmelina
- 1973-1977 Volksschule in Krems
- 1977-1985 Bundesrealgymnasium in Krems
- 11.6.1985 Matura am BRG Krems
- 1985-1986 Grundwehrdienst
- 1986-1993 Studium Vermessungswesen, Wahlfachgruppe Landesvermessung und Ingenieurgeodäsie, TU-Wien
- 31.10.1988 1. Diplomprüfung Vermessungswesen
- 1992-1993 Diplomarbeit zum Thema *Untersuchung und Einsatz eines hydrostatischen Messsystems im Speicherkraftwerk Zillergründl*
- 8.11.1993 2. Diplomprüfung Vermessungswesen
- 1997-2002 Doktoratsstudium Vermessungswesen
- 7.11.2002 Rigorosum
- 1989-1992 Studienassistent am Institut für Landesvermessung und Ingenieurgeodäsie, Abt. Ingenieurgeodäsie, Prof. H. Kahmen, TU-Wien
- 1993-1997 Angestellter der Firma Geodata GmbH in Leoben/Steiermark
- 1997-1998 Vertragsassistent am Institut für Geodäsie und Geophysik, Abt. Angewandte Geodäsie und Ingenieurgeodäsie, Prof. H. Kahmen, TU-Wien
- 1998-2001 Universitätsassistent am Institut für Geodäsie und Geophysik, Abt. Angewandte Geodäsie und Ingenieurgeodäsie, Prof. H. Kahmen, TU-Wien
- seit 2001 Angestellter der Firma Geodata ZT GmbH in Leoben/Steiermark
- seit 1998 Verheiratet mit Heidemarie Chmelina
- 2000 Geburt des Sohnes Julian Chmelina
- 2002 Geburt des Sohnes Moritz Chmelina

GEOWISSENSCHAFTLICHE MITTEILUNGEN

Bisher erschienen:

- Heft 1 Kolloquium der Assistenten der Studienrichtung Vermessungswesen. 1970-1973, Dezember 1976.
- Heft 2 EGGER-PERDICH-PLACH-WAGENSOMMERER, Taschenrechner HP 45 und HP 65, Programme und Anwendungen im Vermessungswesen. 1. Auflage, März 1974, Special Edition in English Juli 1974, 2. verbesserte Auflage, November 1974.
- Heft 3 Kolloquium der Assistenten der Studienrichtung Vermessungswesen. 1973-1974, September 1974.
- Heft 4 EGGER-PALFINGER-PERDICH-PLACH-WAGENSOMMERER, Tektronix-Tischrechner TEK 31, Programmbibliothek für den Einsatz im Vermessungswesen, November 1974.
- Heft 5 K. LEDERSTEGER, Die horizontale Isostasie und das isostatische Geoid, Februar 1975.
- Heft 6 F. REINHART, Katalog von FK4 Horrebow-Paaren für Breiten von +30 bis +60, Oktober 1975.
- Heft 7 Arbeiten aus dem Institut für Höhere Geodäsie, Wien, Dezember 1975.
- Heft 8 Veröffentlichungen des Instituts für Photogrammetrie zum XIII. Internationalen Kongreß für Photogrammetrie in Helsinki 1976, Wien, Juli 1976.
- Heft 9 W. PILLEWIZER, Felsdarstellung aus Orthophotos, Wien, Juni 1976.
- Heft 10 PERDICH-PLACH-WAGENSOMMERER, Der Einsatz des programmierbaren Taschenrechners Texas Instruments SR-52 mit Drucker PC100 in der ingenieurgeodätischen Rechentechnik Wien, Mai 1976.
- Heft 11 Kolloquium der Assistenten der Studienrichtung Vermessungswesen. 1974-1976, November 1976.
- Heft 12 Kartographische Vorträge der Geodätischen Informationstage 1976, Wien, Mai 1976.
- Heft 13 Veröffentlichungen des Instituts für Photogrammetrie anlässlich des 80. Geburtstages von Prof. Dr. h.c. K. Neumaier, Wien, Januar 1978.
- Heft 14 L. MOLNAR, Self Checking Analytical Relative Orientation and Strip Formation, Wien, Dezember 1978.
- Heft 15 Veröffentlichungen des Instituts für Landesvermessung anlässlich des 80. Geburtstages von Prof. Dr. Alois Bavor, Wien, Januar 1979.
- Heft 16 Kolloquium der Assistenten der Studienrichtung Vermessungswesen. 1976-1978, November 1979.
- Heft 17 E. VOZIKIS, Die photographische Differentialumbildung gekrümmter Flächen mit Beispielen aus der Architekturbildmessung, Wien, Dezember 1979.
- Heft 18 Veröffentlichungen des Instituts für allgemeine Geodäsie anlässlich des 75. Geburtstages von Prof. Dipl.-Ing. Dr. F. Hauer, Die Höhe des Großglockners, Wien, 1981.
- Heft 19 H. KAGER, Bündeltriangulation mit indirekt beobachteten Kreiszentren, Wien, April 1981.
- Heft 20 Kartographische Vorträge der Geodätischen Informationstage 1980, Wien, Mai 1982.
- Heft 21 Veröffentlichungen des Instituts für Kartographie anlässlich des 70. Geburtstages von Prof. Dr. Wolfgang Pillewizer: Glaziologie und Kartographie, Wien, Dezember 1982.

- Heft 22 K. TEMPFLI, Genauigkeitsschätzung digitaler Höhenmodelle mittels Spektralanalyse, Wien, Mai 1982.
- Heft 23 E. CSAPLOVICS, Interpretation von Farbinfrarotbildern, Wien, November 1982.
- Heft 24 J. JANSKA, Rektifizierung von Multispektral-Scanneraufnahmen - Entwicklung und Erprobung eines EDV-Programms, Wien, Mai 1983.
- Heft 25 Zusammenfassung der Diplomarbeiten, Dissertationen und Habilitationen an den geodätischen Instituten der TU Wien, Wien, November 1984.
- Heft 26 T. WUNDERLICH, Die voraussetzungsfreie Bestimmung von Refraktionswinkeln, Wien, August 1985.
- Heft 27 G. GERSTBACH (Hrsg.), Geowissenschaftliche/geotechnische Daten in Landinformationssystemen - Bedarf und Möglichkeiten in Österreich, Juni 1986.
- Heft 28 K. NOVAK, Orientierung von Amateuraufnahmen ohne Paßpunkte, Wien, August 1986.
- Heft 29 Veröffentlichungen des Instituts für Landesvermessung und Ingenieurgeodäsie, Abt. Ingenieurgeodäsie, anlässlich des 80. Geburtstages von Prof. Dipl.-Ing. Dr. F. Hauer, Wien, Oktober 1986.
- Heft 30 K.-H. ROCH, Über die Bedeutung dynamisch ermittelter Parameter für die Bestimmung von Gesteins- und Gebirgseigenschaften, Wien, Februar 1987.
- Heft 31 G. HE, Bildverbesserung mittels digitaler Filterung, Wien, April 1989.
- Heft 32 F. SCHLÖGELHOFER, Qualitäts- und Wirtschaftlichkeitsmodelle für die Ingenieurphotogrammetrie, Wien, April 1989.
- Heft 33 G. GERSTBACH (Hrsg.), Geowissenschaftliche/geotechnische Daten in Landinformationssystemen - Datenbestände und Datenaustausch in Österreich, Wien, Juni 1989.
- Heft 34 F. HOCHSTÖGER, Ein Beitrag zur Anwendung und Visualisierung digitaler Geländemodelle, Wien, Dezember 1989.
- Heft 35 R. WEBER, Lokale Schwerefeldmodellierung unter Berücksichtigung spektraler Methoden zur Geländereduktion, Wien, April 1990.
- Heft 36 o. Prof. Dr. Hans Schmid zum 70. Geburtstag. Veröffentlichung der Abteilung für Landesvermessung, Wien, Oktober 1990.
- Heft 37 G. GERSTBACH, H. P. HÖLLRIEGL und R. WEBER, Geowissenschaftliche Informationsbörse - Eine Nachlese zur GeoLIS II, Wien, Oktober 1990.
- Heft 38 R. ECKER, Rastergraphische Visualisierungen mittels digitaler Geländemodelle, Wien, August 1991.
- Heft 39 Kartographische Forschungen und anwendungsorientierte Entwicklungen, herausgegeben von W. Stams und F. Kelnhofer zum 80. Geburtstag von Prof. Dr. W. Pillewizer, Wien, Juli 1991.
- Heft 39a W. RIEGER, Hydrologische Anwendungen des digitalen Geländemodell, Wien, Juli 1992.
- Heft 40 K. STEINNOCHER, Methodische Erweiterungen der Landnutzungsklassifikation und Implementierung auf einem Transputernetzwerk, Wien, Juli 1994.
- Heft 41 G. FORKERT, Die Lösung photogrammetrischer Orientierungs- und Rekonstruktionsaufgaben mittels allgemeiner kurvenförmiger Elemente, Wien, Juli 1994.
- Heft 42 M. SCHÖNER, W. SCHÖNER, Photogrammetrische und glaziologische Untersuchungen am Gsbre (Ergebnisse der Spitzbergenexpedition 1991), Wien, Mai 1996.

- Heft 43 M. ROIC, Erfassung von nicht signalisierten 3D-Strukturen mit Videotheodoliten, Wien, April 1996.
- Heft 44 G. RETSCHER, 3D-Gleiserfassung mit einem Multisensorsystem und linearen Filterverfahren, Wien, April 1996.
- Heft 45 W. DAXINGER, Astrogravimetrische Geoidbestimmung für Ingenieurprojekte, Wien, Juli 1996.
- Heft 46 M. PLONER, CCD-Astrometrie von Objekten des geostationären Ringes, Wien, November 1996.
- Heft 47 Zum Gedenken an Karl Killian „Ingenieur“ und „Geodät“ 1903-1991, Veröffentlichung der Fachgruppe Geowissenschaften, Wien, Februar 1997.
- Heft 48 A. SINDHUBER, Ergänzung und Fortführung eines digitalen Landschaftsmodelles mit multispektralen und hochauflösenden Fernerkundungsaufnahmen, Wien, Mai 1998.
- Heft 49 W. WAGNER, Soil Moisture Retrieval from ERS Scatterometer Data, Wien, Dezember 1998.
- Heft 50 R. WEBER, E. FRAGNER (Editoren), Prof. Bretterbauer, Festschrift zum 70. Geburtstag, Wien, Juli 1999.
- Heft 51 Ch. ÖHRENER, A Similarity Measure for Global Image Matching Based on the Forward Modeling Principle, Wien, April 1999.
- Heft 52 M. LECHTHALER, G. GARTNER (Hrsg.), Per Aspera ad Astra, Festschrift für Fritz Kelnhofer zum 60. Geburtstag, Wien, Jänner 2000.
- Heft 53 F. KELNHOFER, M. LECHTHALER (Hrsg.), Interaktive Karten (Atlanten) und Multimedia-Applikationen, Wien, März 2000.
- Heft 54 A. MISCHKE, Entwicklung eines Videotheodolit-Meßsystems zur automatischen Richtungsmessung von nicht signalisierten Objektpunkten, Wien, Dezember 2000.
- Heft 55 Veröffentlichung des I.P.F. anlässlich der Emeritierung von Prof. Dr. Peter Waldhäusl, Wien, September 2001.
- Heft 56 F. ROTTENSTEINER, Semi-automatic Extraction of Buildings Based on Hybrid Adjustment Using 3D Surface Models and Management of Building Data in a TIS, Wien, Mai 2001.
- Heft 57 D. LEGENSTEIN, Objektrekonstruktion aus perspektiven Bildern unter Einbeziehung von Umrisslinien, Wien, Juli 2001.
- Heft 58 F. KELNHOFER, M. LECHTHALER und K. BRUNNER (Hrsg.), Telekartographie und Location Based Services, Wien, Jänner 2002.
- Heft 59 K. BRETTERBAUER, Die runde Erde eben dargestellt: Abbildungslehre und sphärische Kartennetzentwürfe, Wien, 2002.
- Heft 60 F. KELNHOFER und K. BRUNNER (Hrsg.), Maps and the Internet, Wien, 2002
- Heft 61 L. DORFFNER, Erzeugung von qualitativ hochwertigen 3D Photomodellen für internetbasierte Anwendungen mit besonderem Augenmerk auf Objekte der Nahbereichsphotogrammetrie, Wien, 2002
- Heft 62 K. CHMELINA, Wissensbasierte Analyse von Verschiebungsdaten im Tunnelbau, Wien, 2002