

Optimierungsmöglichkeiten beim Tunnelbau durch geologisch-geotechnische Begleitung / Überwachung und laufende Besserung des Baugrundmodells

Wulf Schubert

Technische Universität Graz & 3G Gruppe Geotechnik Graz ZT GmbH, Graz

KURZFASSUNG

Auch die beste Erkundung führt bei Untertagebauten nicht zu einem vollständigen und „richtigen“ Baugrundmodell. Unsicherheiten in Bezug auf Gebirgsaufbau, Struktur und Qualität kennzeichnen insbesondere Tunnel mit hoher Überlagerung. Zur sicheren und wirtschaftlichen Durchführung von Untertagebauvorhaben ist daher nicht nur eine entsprechende Vorbereitung in der Planungsphase, sondern auch eine laufende baubegleitende Aktualisierung des Baugrundmodells und eine damit einhergehende Anpassung der bautechnischen Maßnahmen erforderlich. Dieser Prozess erfordert eine aktive Mitwirkung der vor Ort tätigen Geologen, die weit über eine reine Dokumentation der angetroffenen geologischen Verhältnisse hinausgeht. Zur Verbesserung des Baugrundmodells während des Baues steht eine Reihe von Möglichkeiten zur Verfügung. Die optimale Nutzung der einzelnen Hilfsmittel erfordert eine interdisziplinäre Zusammenarbeit vor Ort. Nach einer grundsätzlichen Darstellung eines strukturierten Ablaufes der laufenden Anpassung werden Fallbeispiele vorgestellt.

1 EINLEITUNG

Die Planung von Untertagebauten unterscheidet sich von jener anderer Ingenieurbauwerke ganz wesentlich. Dies ist darin begründet, dass viele Unsicherheiten bezüglich Gebirgsbeschaffenheit, dessen Verhalten, der im Gebirge herrschenden Spannungen und der Bergwasserverhältnisse existieren. Diese Komplexität erschwert die Erfassung des „statischen Systems“ und der auf die Strukturen einwirkenden „Belastungen“.

Um trotz aller Unsicherheiten eine nachvollziehbare ingenieurmäßige Planung und Herstellung von untertägigen Hohlräumen sicherzustellen, ist eine Dimensionierungsstrategie erforderlich, welche in mehreren Schritten vorgeht und hierbei ein klares geomechanisches Dimensionierungskonzept mit einer optimalen Anpassung der Baumaßnahmen an die jeweiligen Verhältnisse vor Ort verbindet. Die Planung soll darüber hinaus sicherstellen, dass das jeweilige Bauwerk wirtschaftlich und sicher hergestellt und über den vorgesehenen Nutzungszeitraum betrieben werden kann.

Die natürliche Streubreite des Baustoffes Gebirge und die Unsicherheiten im Baugrundmodell erfordern eine laufende Verbesserung des Modells und Anpassung der Baumaßnahmen an die aktuellen Verhältnisse während des Baues. Zur erfolgreichen Umsetzung sind einerseits geeignete

Methoden der Beobachtung vor Ort zu implementieren, andererseits eine effiziente Organisation aufzubauen und eine entsprechende Kompetenz der vor Ort Tätigen sicherzustellen. Für den Fall der Abweichung des Gebirgs- bzw. Systemverhaltens von der erwarteten Bandbreite ist ein entsprechendes Managementkonzept zu erarbeiten.

2 BAUVORBEREITUNGSPHASE

2.1 *Geologisches Modell*

Grundlage jeder Planung eines untertägigen Bauwerkes ist ein, der Projektphase entsprechend detailliertes geologisches Modell. Die Erkundung und die daraus abgeleiteten Ergebnisse müssen auf die Anforderungen und Randbedingungen des jeweiligen Projektes abgestimmt sein. Um dies zu ermöglichen, ist von Seiten des Auftraggebers sicherzustellen, dass die Anforderungen und Randbedingungen bereits in einem sehr frühen Planungsstadium definiert werden. Eine strikte Unterteilung in geologische Erkundung, geotechnische Bearbeitung und Bauwerksplanung ist nicht zielführend, vielmehr sollte darauf geachtet werden, dass die geologisch - geotechnischen Arbeiten von Beginn an koordiniert ablaufen.

Abbildung 1 zeigt ein Beispiel für ein dreidimensionales Gebirgsmodell für ein Tunnelprojekt. Es zeigt sich immer wieder, dass ein in sich konsistentes Modell nur dann zuverlässig sichergestellt werden kann, wenn es räumlich konstruiert wird.

Die im Laufe der Projektentwicklung erkundeten geologischen Daten werden kontinuierlich in das Modell eingearbeitet und ergeben in verschiedenen Projektphasen eine unterschiedliche Dichte an Informationen. Durch die Verknüpfung der gezielt erhobenen Daten (beispielhaft sind Gebirgsaufbau und Störungssysteme dargestellt) entsteht ein geologisch-geotechnisches Modell, das die Grundlage für die weitere geomechanische Planung darstellt. Zur in jeder Projektphase notwendigen Risikoabschätzung sind auch die Unsicherheiten im geologischen Modell, z.B. Streuung der lithologischen Grenzen, Lage und Mächtigkeit von Störungszonen, etc. anzugeben (1, 2).

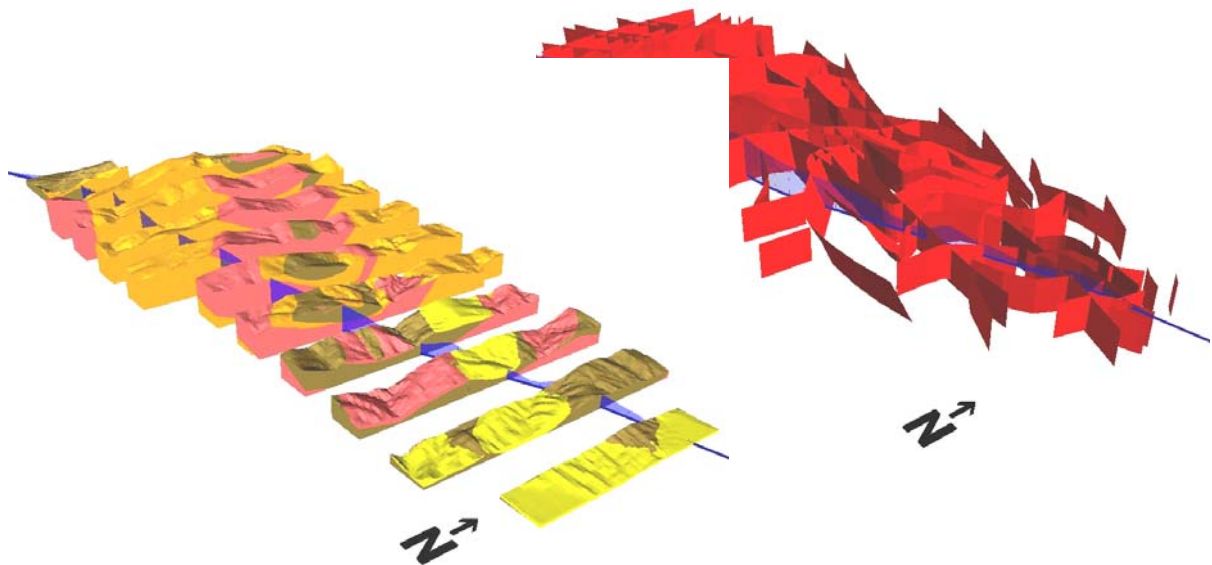


Abbildung 1 Beispiel eines dreidimensionalen geologischen Baugrundmodells; lithologische Situation (links), Störungssystem (rechts)

2.2 *Bestimmung von Gebirgsarten*

Unter Gebirgsart versteht man ein geotechnisch relevantes Gesteinsvolumen inklusive seiner Trennflächen und tektonischen Struktur (Gebirge), welches gleichartige mechanische und gegebenenfalls hydraulische Eigenschaften aufweist.

Unterschiedliche Parameter können in verschiedenen Gebirgsarten das mechanische und hydraulische Verhalten bestimmen. Es ist daher zweckmäßig, für die erwarteten Gesteinsarten jene Parameter zu identifizieren, welche das Verhalten des Gebirges maßgeblich beeinflussen. Diese Parameter werden als Schlüsselparameter bezeichnet (3). Sie können von Gesteinsart zu Gesteinsart variieren. Während z.B. bei geschiefertem Gebirge die Beschaffenheit der Schieferung in den meisten Fällen maßgebend für das Gebirgsverhalten beim Tunnelbau sein wird, sind es bei massigem Konglomerat die Korngröße, der Grad der Zementierung, das Verhältnis von feinkörniger Matrix und Grobkomponenten und der daraus resultierenden Festigkeit.

Darüber hinaus ist bei der Festlegung der Schlüsselparameter auch auf projektspezifische Randbedingungen Rücksicht zu nehmen. So ist z.B. bei Tunneln mit geringer Überlagerung in festem Gestein die Festigkeit des Gesteins von untergeordneter Bedeutung, während die Trennflächeneigenschaften, die Anzahl der Klufscharen und die Zerlegung das Verhalten bestimmen werden. Bei hoher Überlagerung hingegen kann die Gesteinsfestigkeit sehr wohl zum maßgebenden Parameter werden.

Die Bestimmung der Gebirgsarten erfolgt auf Basis des jeweiligen Wissensstandes unter Bedachtnahme auf deren Bedeutung für die Errichtung des Bauwerkes. Die Anzahl der zu bestimmenden Gebirgsarten ist daher sowohl projektspezifisch als auch planungsphasenabhängig und ergibt sich aus der Komplexität der geologischen Verhältnisse. In der Regel wird in frühen Projektphasen eine grobe Unterteilung ausreichend sein. Mit zunehmender Kenntnis und Planungstiefe wird eine weitere Unterteilung möglich bzw. zweckdienlich sein.

2.3 *Räumliche Zuordnung von Gebirgsarten und Einflussfaktoren*

Zur Ermöglichung einer Analyse des Gebirgsverhaltens ist es notwendig, einem repräsentativem Gebirgsvolumen entlang der Tunneltrasse die jeweiligen Gebirgsarten zuzuordnen. Darüber hinaus sind die Einflussfaktoren, wie Orientierung der maßgeblichen Trennflächen in Relation zur Bauwerksachse, die Primärspannung, sowie die Bergwasserverhältnisse jedem Bereich zuzuordnen. Bereiche mit gleichen Gebirgsarten und annähernd gleichen Einflussfaktoren können in Einheiten zusammengefasst werden.

2.4 *Ermittlung des Gebirgsverhaltens*

Ein wesentlicher Schritt im gesamten Planungsprozess ist die Ermittlung des Gebirgsverhaltens, wobei hier das Gebirgsverhalten als Reaktion des Baugrundes auf den Ausbruch des Tunnels ohne Einfluss von sonstigen bautechnischen Maßnahmen zu verstehen ist. In diesem Schritt sollen die möglichen Versagensmechanismen identifiziert werden, auf welche letztlich die bautechnischen Maßnahmen abzustimmen sind.

2.5 *Festlegen der Randbedingungen und Anforderungen*

Neben selbstverständlichen Anforderungen an das Bauwerk, wie die Gebrauchstauglichkeit, die Verträglichkeit der verwendeten Materialien mit den Spannungen und Dehnungen, sind auch projektspezifische Anforderungen und Randbedingungen vor der Festlegung von bautechnischen Maßnahmen abzuklären, bzw. zu definieren. Zu den Anforderungen gehören unter anderem Forderungen nach Begrenzung der Oberflächensetzung wegen Bebauung, Restriktionen in der Störung des Grundwasserhaushaltes, oder Begrenzung von Erschütterungen. Zu den Randbedingungen können unter anderem länderspezifische Regelwerke in Bezug auf die Bemessung, aber auch Erfahrung und Qualifikation der in der Region zur Verfügung stehenden Unternehmer und Mineure gezählt werden.

2.6 *Festlegen der bautechnischen Maßnahmen*

Basierend auf dem für eine Einheit ermittelten Gebirgsverhalten werden in diesem Schritt die bautechnischen Maßnahmen festgelegt. Dazu zählen alle Maßnahmen, welche das Verhalten des Gebirges beeinflussen, also neben einer eventuellen Querschnittsunterteilung und Stützmaßnahmen auch die Absenkung des Grundwasserspiegels, vorseilende Sicherungen oder Baugrundverbesserungen, etc.

Bei der Festlegung der bautechnischen Maßnahmen ist einerseits das zuvor ermittelte Gebirgsverhalten und die möglichen Versagensmechanismen, andererseits sind die Randbedingungen und Anforderungen zu berücksichtigen. Ziel aller Maßnahmen ist jedenfalls das Erreichen eines allen Anforderungen gerecht werdenden Systems.

2.7 *Ermittlung und Überprüfung des Systemverhaltens*

Das Verhalten des Gesamtsystems aus Gebirge, Einflussfaktoren und bautechnischen Maßnahmen wird nunmehr ermittelt und den Anforderungen gegenübergestellt. Sind die Anforderungen nicht befriedigend erfüllt, sind die bautechnischen Maßnahmen entsprechend anzupassen. Da die Anforderungen unter Umständen mit unterschiedlichen bautechnischen Maßnahmen erfüllt werden können, ist ein Optimierungsprozess im Hinblick auf Wirtschaftlichkeit und Sicherheit, sowie Auswirkungen auf die Umwelt durchzuführen.

2.8 *Vortriebsklassifizierung*

Aus bauvertraglicher Sicht ist in den meisten Ländern eine Klassifizierung der Vortriebs- und Stützmaßnahmen üblich. Wesentliche Elemente der Klassifizierung sind beim konventionellen Vortrieb meist Querschnittsunterteilung, Abschlagslänge und Stützmittel nach Art und Menge.

3 BAUAUSFÜHRUNGSPHASE

Der Umstand, dass in den meisten Fällen die tatsächlichen Gebirgsverhältnisse vor dem Bau nicht mit genügender Genauigkeit zu prognostizieren sind erfordert zur sicheren und wirtschaftlichen Durchführung des Baues eine laufende Fortschreibung und Verbesserung des Baugrundmodells und die entsprechende Anpassung der bautechnischen Maßnahmen. Dieser Prozess erfordert sowohl entsprechende Kompetenz der vor Ort tätigen, als auch eine entsprechende Organisation.

Eine wesentliche Rolle in der Entscheidungsvorbereitung spielen dabei Geologe und Geotechniker vor Ort. Die richtige Ansprache des Gebirges, die Bestimmung der jeweiligen Gebirgsart und das in Kombination mit den Einflussfaktoren abgeleitete Gebirgsverhalten, welches Grundlage für die Zuordnung der entsprechenden bautechnischen Maßnahmen ist, sind verantwortungsvolle Tätigkeiten, welche über eine normale Dokumentation und Überwachung weit hinausgehen.

Baumaßnahmen, wie z.B. Abschlagslänge, Übermaß zur Berücksichtigung von Konvergenzen, oder Auskleidungsstärke müssen zum überwiegenden Teil vor dem Ausbruch festgelegt werden, da nach dem Ausbruch nur mehr geringfügige Änderungen, wie z.B. Anzahl und Länge von Ankern oder Felsbolzen vorgenommen werden können. Diese Festlegungen sind auf der Basis der Prognose der Verhältnisse vor der Ortsbrust zu treffen, was die Bedeutung der laufenden Prognose unterstreicht.

Grundsätzlich sollte während des Baues ein ähnlicher Ablauf wie während der Planung gewählt werden, damit eine Nachvollziehbarkeit und Vergleichbarkeit mit der Planung gewährleistet ist. Abbildung 2 zeigt den grundsätzlichen Ablauf der Detailfestlegung von Ausbruch und Stützung und Überprüfung des prognostizierten Systemverhaltens.

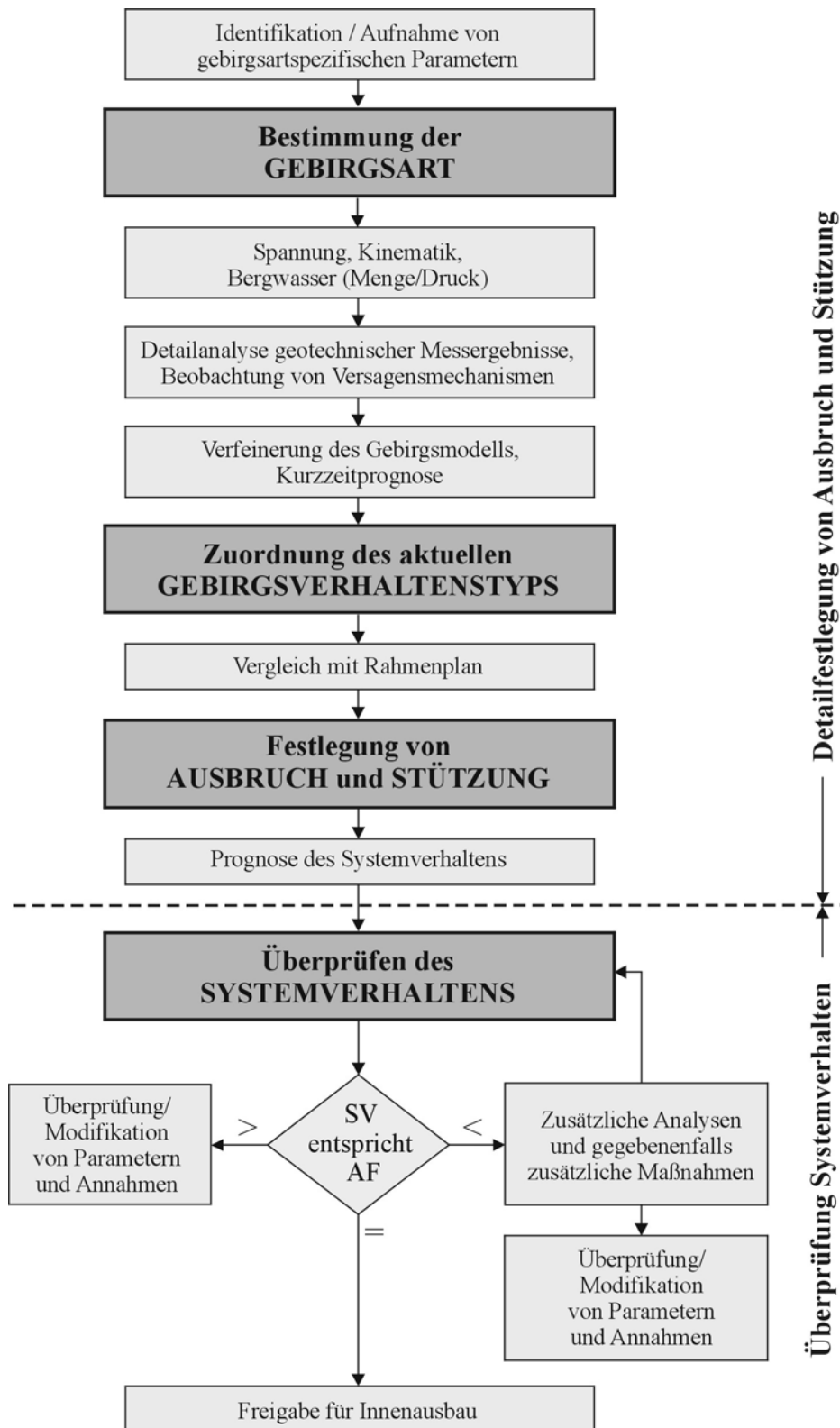


Abbildung 2. Schematischer Ablauf der Detailfestlegung von Ausbruch und Stützung und Überprüfung des Systemverhaltens (4)

3.1 Geologische Aufnahme vor Ort

Die geologische Aufnahme vor Ort soll so vorgenommen werden, dass neben der reinen Dokumentation der angetroffenen Verhältnisse eine Prognose in ein repräsentatives Volumen, welches das Verhalten des Bauwerkes bestimmt, möglich ist. Zur Bestimmung der jeweiligen Gebirgsart ist es erforderlich, sich auf die Aufnahme jener Parameter zu konzentrieren, welche für das Verhalten maßgeblich sind (Schlüsselparameter). Im Wesentlichen decken sich diese Parameter mit jenen in der Planung verwendeten, allerdings weicht die Bestimmung vor Ort unter Umständen von jener während der Planungsphase ab, da ja während des Baues nur in Ausnahmefällen Laborversuche durchgeführt werden. Es ist daher zweckmäßig, die Parameter sowie deren Bestimmung und die für die Zuordnung oder Klassifizierung verwendeten Kategorien vorbereitend festzulegen.

Die immer noch übliche Art der Handskizze und Aufnahme des Gefüges mit dem Kompass als einzige Dokumentation weist mehrere Nachteile auf:

- Sie ist nur bedingt geometrisch richtig
- Messungen sind in der Regel nur in den leicht erreichbaren Partien der Ortsbrust möglich
- Kompassmessungen können durch Stahleinbauten beträchtliche Fehler aufweisen
- Es besteht die Gefahr der Subjektivität und damit der Verlust von eventuell wichtigen Informationen

Zur Unterstützung der Aufnahme sollten daher zumindest von jedem Abschlag auch Fotos gemacht werden. Noch besser, aber auch aufwändiger sind stereofotografische Aufnahmen (5), welche eine komplette und metrische Information liefern und ein nachträgliches Auswerten von Daten (Messen von Kluftorientierungen, Abständen am Bild, etc.) ermöglichen.

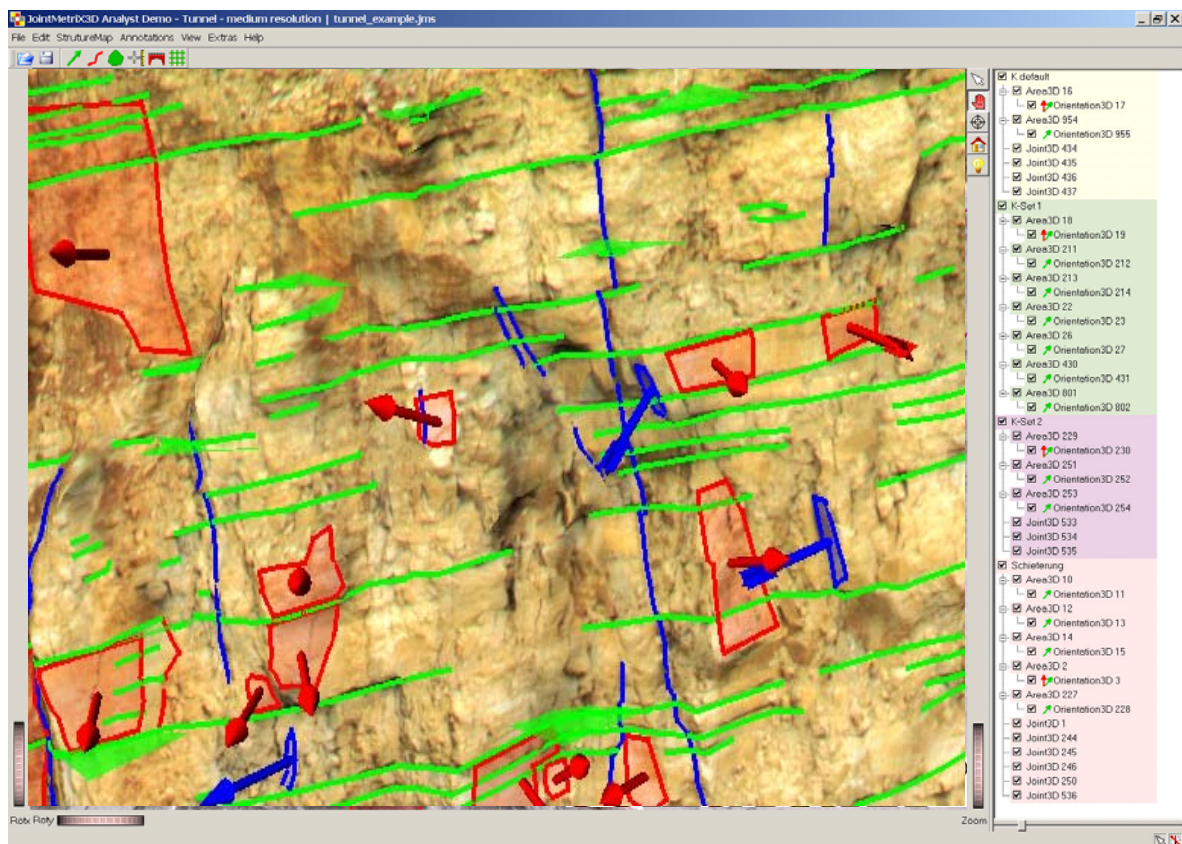


Abbildung 3. Beispiel einer Auswertung einer stereofotografischen Aufnahme mit JointMetrix3D

Neben der Aufnahme der Ortsbrust und der freigelegten Laibung stehen in beschränktem Umfang Bohrungen (Vollbohrungen oder Kernbohrungen), sowie seismische und geoelektrische Methoden zur Vorauserkundung zur Verfügung, welche jedoch aus Zeit- und Kostengründen nur selten eingesetzt werden. Die gesammelten Informationen werden dazu verwendet, einerseits das geologische Modell im bereits aufgefahrenen Bereich zu ergänzen und erforderlichenfalls zu korrigieren, und andererseits laufend eine Kurzzeitprognose für die nächsten Abschlüge zu erstellen. Da das Verhalten des Systems Gebirge-Ausbau maßgeblich von dem den Tunnel umgebenden Gebirge beeinflusst wird, ist eine Modellierung in eine Tiefe bis etwa drei Tunneldurchmesser außerhalb der Laibung, bzw. Ortsbrust erforderlich.

Zusätzlich zu den genannten Erhebungsmethoden können auch die Ergebnisse der im Tunnel vorgenommenen Verschiebungsmessungen zur Kurzzeitprognose herangezogen werden.

3.2 *Verwendung von Verschiebungsmessdaten zur Kurzzeitprognose*

Seit der Durchführung von Messungen der Verschiebungen von vermarkten Punkten (Targets) im Raum mittels Totalstationen hat der Informationsgehalt der Messdaten wesentlich zugenommen. Man kann davon ausgehen, dass bei gleich bleibenden Gebirgsverhältnissen und gleicher Vorgangsweise bei Ausbruch und Stützung auch das Deformationsmuster annähernd gleich ist. Auch zu- oder abnehmende Überlagerung wird daran qualitativ nicht viel verändern, sofern nicht durch die geänderten Spannungsverhältnisse andere Mechanismen dominierend werden. Daraus folgt, dass eine Änderung der Gebirgsverhältnisse im Nahbereich des Tunnels zwangsläufig auch zu einem anderen Deformationsmuster führen muss, das über die Verschiebungsmessung zu beobachten ist.

Zur optimalen Ausbeute der Messdaten in Hinblick auf die Kurzzeitprognose müssen daher Methoden angewendet werden, die über die üblichen Darstellungen von Zeit-Verschiebungsdiagrammen hinausgehen. Gut bewährt haben sich in dieser Hinsicht die Auswertung von Trends von Verhältnissen verschiedener Verschiebungskomponenten eines Messpunktes oder der Verhältnisse von gleichen Verschiebungskomponenten verschiedener Messpunkte.

3.2.1 *Verhältnisse der Vertikalverschiebung unterschiedlicher Punkte*

Bei dieser Auswertung wird bei jedem Messquerschnitt der Quotient aus den Vertikalverschiebungen verschiedener Punkte im selben Querschnitt errechnet und in Form eines Trends dargestellt. Üblich ist die Auswertung von Verhältnissen der First- und Ulmsetzungen, aber auch der Verhältnisse Ulm rechts zu Ulm links. Unter der Voraussetzung eines entsprechend kurzen Abstandes der Messquerschnitte kann mit dieser Form der Auswertung bereits frühzeitig das Annähern des Vortriebes an steil- bis mittelsteil einfallende und spitzwinklig zur Tunnelachse streichende Schwächezonen erkannt werden.

Die Schwächezone außerhalb des Querschnittes führt zu einer Erhöhung der Beanspruchung des Gebirges zwischen Laibung und Schwächezone, welche sich in (einseitig) erhöhten Deformationen äußert. Als Beispiel für eine solche Auswertung wird eine Situation im Inntaltunnel herangezogen (Abbildung 4), wo sich der Vortrieb an eine mittelsteil einfallende und schleifend zur Tunnelachse streichende Störungszone annäherte. Die gemessenen Ulmsetzungen waren bei weitgehend ungestörten Gebirgsverhältnissen in der Größenordnung von 20% bis 40% der gemessenen Firstsetzungen. Wie aus der Abbildung ersichtlich, nahmen die Setzungen der rechten Ulme mit zunehmender Annäherung des Vortriebes an die Störungszone bereits mehrere Durchmesser vor dem Aufschluss an der Ortsbrust überproportional zu. Das Verhältnis der Setzung zwischen dem der Störung abgewandten linken Ulm und der Firste blieb in diesem Bereich hingegen weitgehend konstant.

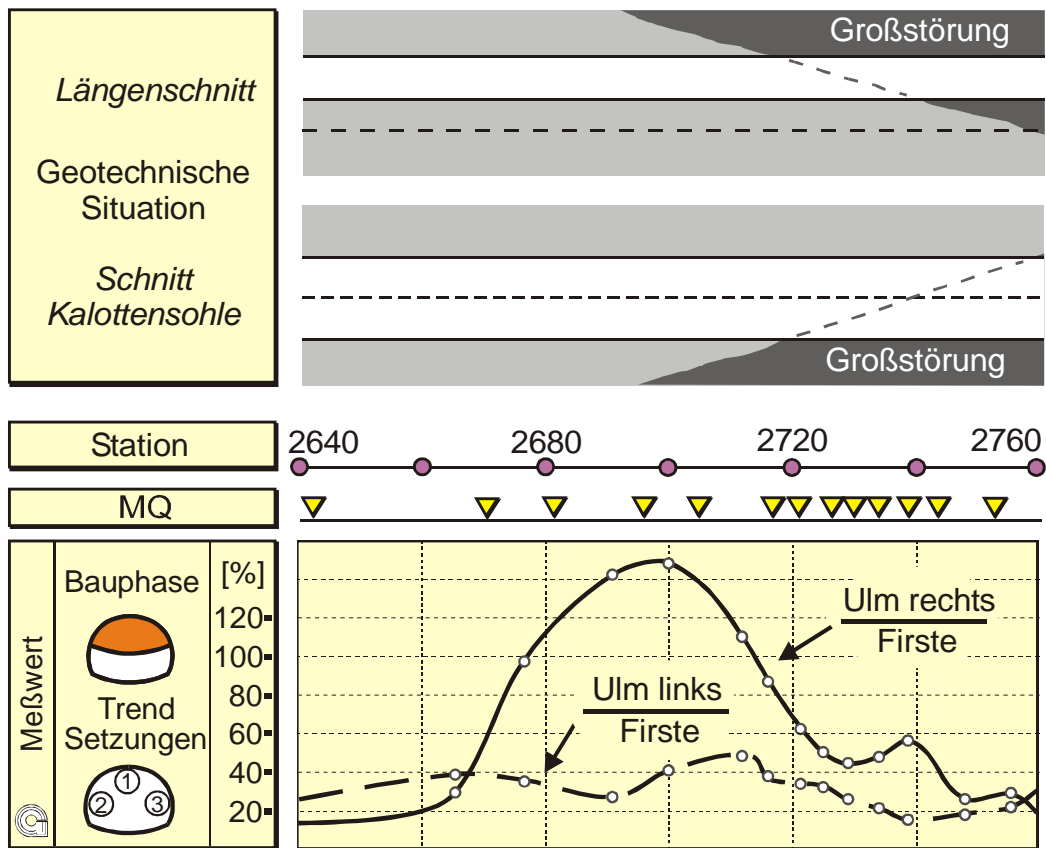


Abbildung 4 Auswertung der Trends von Verhältnissen zwischen Ulmsetzungen und Firstsetzung zur Früherkennung von Schächezonen ausserhalb des Querschnittes (6)

3.2.2 Verschiebungsvektororientierung

In ähnlicher Weise wie die Quotienten aus den Verschiebungskomponenten verschiedener Punkte, kann auch die Veränderung der Orientierung der Verschiebungsvektoren zur Unterstützung der Prognose des den Hohlraum umgebenden Gebirges herangezogen werden. Auch bei dieser Auswertung zeigt sich, dass weit außerhalb des Ausbruchsquerschnittes gelegene Strukturen das Verformungsverhalten des Gebirges beeinflussen, und damit messbar werden. Abbildung 5 zeigt ein Beispiel einer Auswertung des Trends der Verschiebungsvektororientierung für den Firstpunkt (unten). Wie aus der Zustandslinie der Firstsetzung (oben) ersichtlich, waren die Setzungen bis etwa Station 1150 gering und steigen dann infolge des Antreffens einer Störung ab Station 1170 stark an. Der Trend der Verschiebungsvektororientierung (Verhältnis aus Längs- zu Vertikalverschiebung) hingegen zeigt bereits ab Station 1090 eine Abweichung von der „normalen“ Orientierung von zwischen 5° bis 10° . Diese Abweichung wächst mit zunehmender Annäherung des Vortriebes an die Störungszone. Dieses Verhaltensmuster konnte bei vielen Vortrieben beobachtet und auch theoretisch nachgewiesen werden (7, 8).

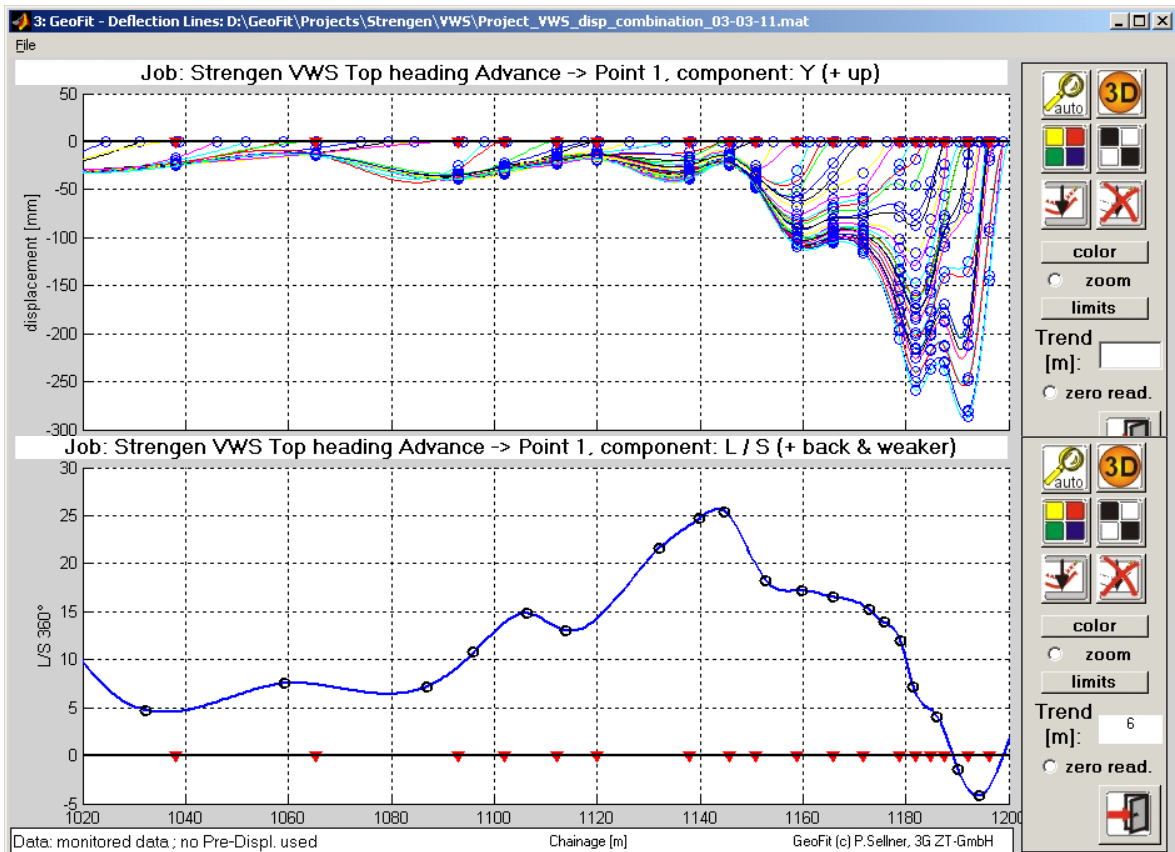


Abbildung 5. Zustandslinien der Firstsetzung (oben) und Trend der Verschiebungsvektororientierung im First (unten) bei der Annäherung des Vortriebes an eine Störungszone bei etwa Station 1170

Bei Annäherung eines Vortriebes im relativ weichen Gebirge an steiferes Gebirge zeigt sich ein genau gegenläufiger Trend in der Verschiebungsvektororientierung. Obwohl mit dieser Methode nur bedingt quantitative Aussagen über Ausmass des Steifigkeitsunterschiedes oder Länge einer Störungszone gemacht werden können, hat sie sich doch als geeignetes Instrument zur Unterstützung der Kurzzeitprognose herausgestellt, und wird bereits bei mehreren Baustellen angewandt (9)

3.2.3 Vorhersage von Verschiebungen

Ein in unserer Gruppe weiter entwickeltes Verfahren zur Vorhersage von Verschiebungen durch Anwendung analytischer Funktionen, welche die Deformation in Abhängigkeit von Vortrieb und Zeit beschreiben (10), lässt sich ebenso zur Vorhersage der geotechnischen Verhältnisse verwenden. Auch bei dieser Methode werden Trends der Funktionsparameter dazu verwendet, um Aussagen über das ausserhalb des sichtbaren Ausbruchsbereiches liegende Gebirge zu treffen (11).

4 KOMBINATION AUS GEOLOGISCHER UND GEOTECHNISCHER ANALYSE

Die laufende Verbesserung des Baugrundmodells erfordert die Zusammenschau aller verfügbaren Informationen. Ziel der Verbesserung ist die Ermöglichung der Wahl einer optimal auf die Baugrundverhältnisse abgestimmte Baumethode und eine Reduktion des mit jedem Untertagebau verbundenen Restrisikos. Abbildung 6 soll einen solchen Prognosevorgang illustrieren, wobei neben strukturgeologischen Überlegungen auch Resultate aus der Auswertung von Verschiebungsmessung herangezogen werden.

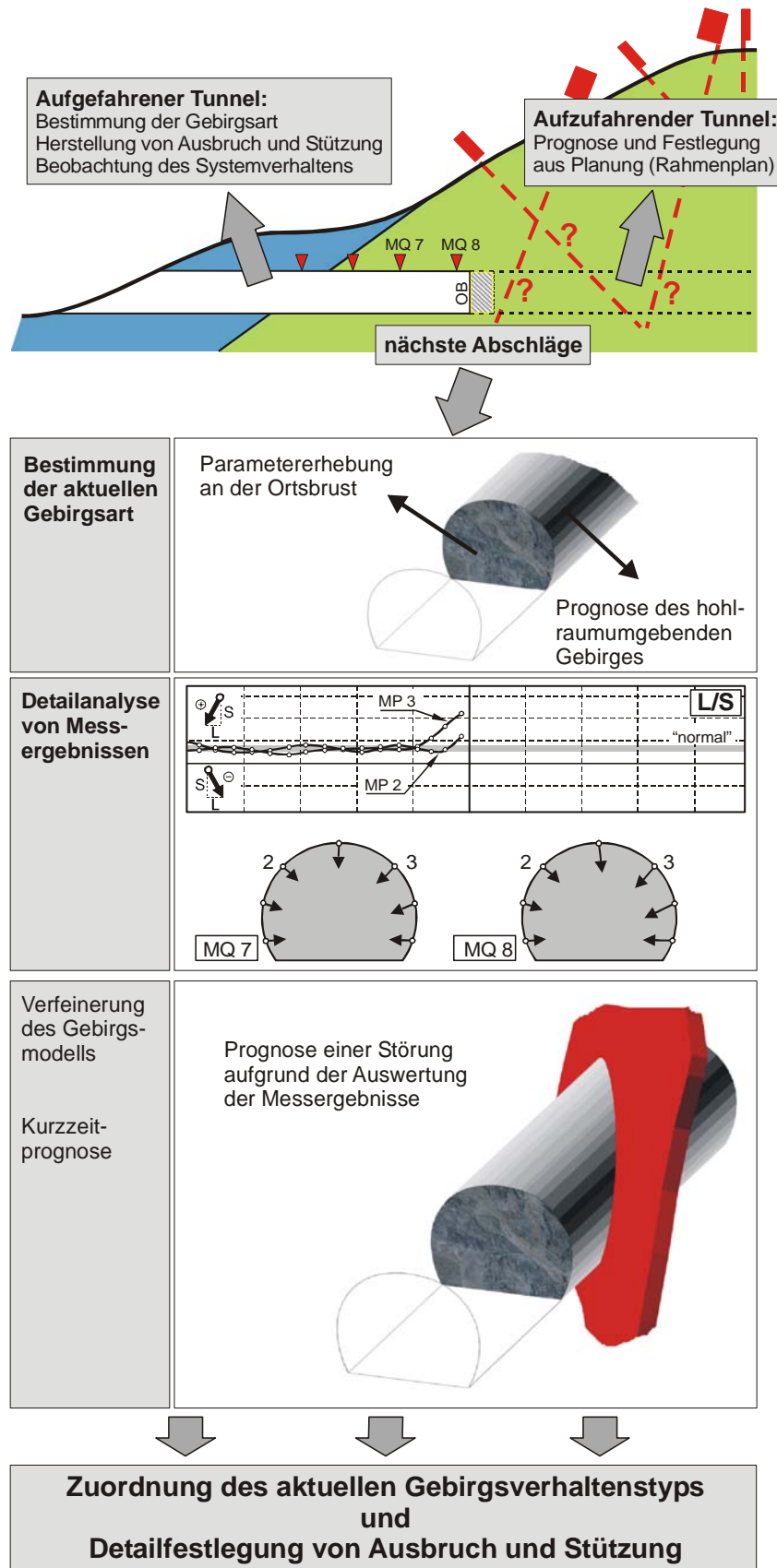


Abbildung 6. Verfeinerung des Prognosemodells durch Auswertung von Verschiebungsvektororientierungen im Längs- und Querschnitt

5 SCHLUSSFOLGERUNG

Die Ausführungen sollen dazu beitragen die Rolle der geologischen Bearbeitung im Zuge der Planung und der Ausführung eines Untertagebauwerks deutlich zu machen. Bei vielen Projekten mangelt es an einer ausreichenden Kommunikation zwischen geologischen und geotechnischen Bearbeitern. Ein intensiver Gedankenaustausch in Kombination mit der Anwendung fortschrittlicher Mittel der Baugrunderkundung sowie spezieller Datenauswertung erlaubt eine laufende Verbesserung des Baugrundmodells während des Baues. Zielgerichtet angewandt kann eine solche Vorgangsweise zu einer Reduktion des Risikos und der Baukosten führen.

REFERENZEN

- 1 Goricki, A. 2003. Classification of Rock Mass Behavior based on a hierarchical Rock Mass Characterization for the Design of Underground Structures. Doctoral thesis, TU-Graz
- 2 Goricki, A., Schick, K.J., Steidl, A., 2002. Quantification of the Geotechnical and Economic Risk in Tunneling. *Probabilistics in Geotechnics: Technical and Economic Risk Estimation*, pp. 483-490. VGE.
- 3 Riedmüller, G. Schubert, W. 2001. Project and rock mass specific investigation for tunnels. In: P.Särkkä, P. Eloranta (eds), *Rock Mechanics a Challenge for Society*, Proc. of the ISRM Regional Symp., EUROCK 2001, Espoo, Finland, 369-376. Balkema
- 4 ÖGG 2001. *Richtlinie für die geomechanische Planung von Untertagebauarbeiten mit zyklischem Vortrieb*. Österreichische Gesellschaft für Geomechanik, Salzburg
- 5 Gaich, A., Fasching, A., Schubert, W. 2003. Improved site investigation. Acquisition of geotechnical rock mass parameters based on 3D computer vision. In: G. Beer (ed), *Numerical Simulation in Tunneling*: 13-46, Springer, Wien
- 6 Steindorfer, A. 1998. Short Term Prediction of Rock Mass Behavior in Tunnelling. *Publication Series of Geotechnical Group Graz*, Vol 1. Graz
- 7 Golser, H. 2001. The application of Finite Element and Boundary Element Methods in Tunnelling. PhD thesis at the Graz University of Technology
- 8 Grossauer, K. 2001. Tunnelling in Heterogeneous Ground -Numerical Investigation of Stresses and Displacements. Diploma Thesis at the Graz University of Technology
- 9 Moritz, B., Grossauer, K., Schubert, W. 2004. Short term prediction of system behaviour of shallow tunnels in heterogeneous ground. *Felsbau* 22, Nr. 5, 44-5. VGE, Essen
- 10 Sellner, P. 2000. Prediction of displacements in tunneling. *Publication Series of Geotechnical Group Graz* Vol 9. Graz
- 11 Grossauer, K., Schubert, W., Kim, Ch.-Y., 2003. Tunnelling in heterogeneous ground - stresses and displacements. In *Proceedings 10th International ISRM Congress*, South Africa, 437-440