

Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 112 (1994)
Heft: 47

Artikel: Geologische 3-D-Modellierung: Anwendung im Unterbau
Autor: Tacher, Laurent / Mayoraz, Raphaël
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-78562>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 16.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Geologische 3-D-Modellierung

Anwendung im Untertagebau

In der Ingenieurgeologie wird die Ausrichtung der geologischen Profile durch die Linienführung des Bauwerkes bestimmt. Die Projektionsebenen sind aber häufig ungeeignet, die Geometrie und die Unsicherheit über den wirklichen Verlauf der Diskontinuitäten wiederzugeben. Die dreidimensionale (3-D), computergestützte Raumdarstellung erweist sich hierbei als effizientes Werkzeug.

In der Hochschulgeologie wird die zweidimensionale (2-D) Darstellung von Strukturen erfolgreich angewandt, weil

VON LAURENT TACHER,
LAUSANNE, UND
RAPHAËL MAYORAZ,
ALAMEDA (USA)

der Geologe beliebig Ort und Orientierung der Profile, meist senkrecht zu den Faltenachsen und Diskontinuitätsflächen, wählen kann. Beim Ingenieurgeologen wird die Wahl der Projektionsebenen durch die Linienführung des Bauwerkes bestimmt, die häufig schief zu den geologischen Strukturen verläuft. Als Folge vermittelt das Profil ein verzerrtes Bild der Gebirgsverhältnisse, indem es durch seine 2-D-Natur die Orthogonalität der Gesteinsdiskontinuitäten (Schichtgrenzen und Störungen) in bezug auf das Bauwerk suggeriert. Die Ungewissheit über den tatsächlichen Verlauf von Diskontinuitäten, die bei der Konzeption von Untertage- und Tagebauten wesentlich mitspielt, ergibt sich durch die Schiefe, die nicht dargestellt werden kann (Bild 1).

Ausserdem spielen die Diskontinuitäten in der Ingenieurgeologie manchmal eine ebenso wichtige Rolle wie die Schichtgrenzen. Doch ist es unmöglich, in einem Profil die Schnittstellen eines Bauwerkes mit sämtlichen Diskontinuitäten aufzuzeigen.

Herkömmliche Darstellungsmethoden

Die gebräuchlichen Darstellungstechniken in der Geologie werden durch das Wesen der verwendeten Hilfsmittel beschränkt. So wird auf einem Blatt Papier im allgemeinen versucht, räumlich stark voneinander variierende Informationen in einer 2-D-Fläche abzubilden. Selbst wenn geologische Profile Strukturen übersichtlich zeigen, gelten sie doch nur für den Bereich, wo sie angefertigt worden waren. Für eine voll-

ständige Raumbeschreibung müsste eine grosse Anzahl Profile konstruiert werden, die schwierig in einer Gesamtsicht zu erfassen sind. Ausserdem suggeriert die Profilansicht die selten anzutreffende Orthogonalität der angeschnittenen Flächen mangels geeigneter Darstellungsmöglichkeiten des Schnittwinkels zwischen der Schnittfläche und der geologischen Diskontinuität.

Auf diese Weise bieten Profile mehrere Interpretationsmöglichkeiten für die räumliche Fortsetzung der beschriebenen 2-D-Strukturen an (z.B. betreffend die Intersektionsbedingungen mit einem Tunnel). Die Qualität der Profile leidet daher unter der Mehrdeutigkeit, die sich durch schiefe Schnittwinkel ergibt. Die geologische Karte stellt einen Sonderfall dar. Man kann sie als einen Schnitt entlang der topographischen Oberfläche betrachten, der anschliessend in eine Horizontalebene projiziert wurde. Dieses Vorgehen

rechtfertigt sich durch die bei den Geländeaufnahmen erhaltene hohe Informationsdichte, hat aber den Nachteil, nur in Oberflächennähe zutreffend zu sein. Des weitern stellt sie keine räumlichen Strukturen dar, die man normalerweise davon ableitet.

Angesichts der inhärenten Einschränkungen von zweidimensional ausgelegten Hilfsmitteln bieten die Methoden der Blockdiagramme oder der Serienprofile eine theoretisch akzeptable Alternative. In der Praxis zeigt sich jedoch, dass sie mit steigender Komplexität an Übersichtlichkeit verlieren, so dass sich ihr Realisierungsaufwand oft nicht rechtfertigen lässt. In solchen Modellen ist es auch ausserordentlich schwierig, die Entwicklung von geometrischen Grundelementen wie Verwerfungsbezüge oder Faltenachsen zu verfolgen.

Folgende Mängel lasten den herkömmlichen Methoden an:

- Sie erlauben keine Gesamtschau aller verfügbaren oder vermuteten Informationen. Die Erhebungskosten verleiten ausserdem dazu, vor allem die teuersten Informationen (Tiefbohrungen, Sondierstollen usw.) hervorzuheben. Auf diese Weise gehen mangels einer korrekten Darstellung sämtlicher Daten Informationen verloren.
- Jegliche Abänderung dieser Modelle, selbst die Betrachtung aus einem an-

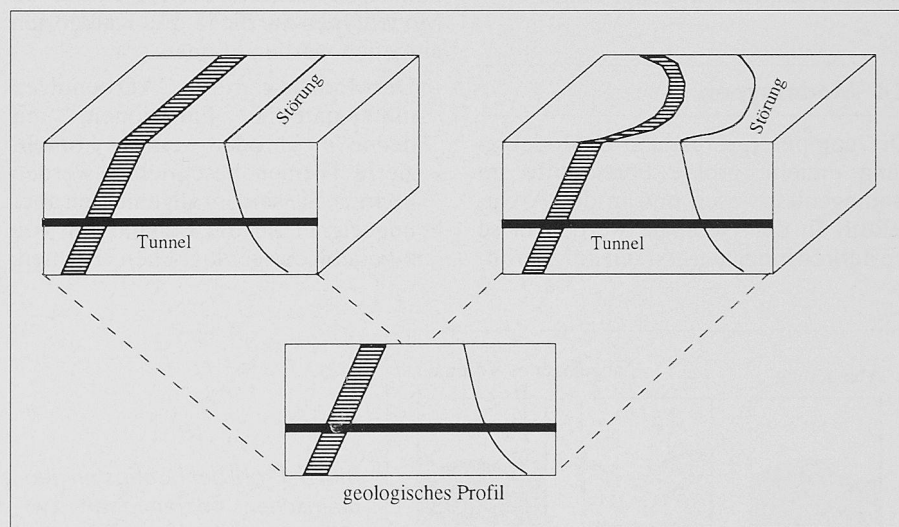


Bild 1. Zwei verschiedene geologische Situationen ergeben das gleiche geologische Profil, das nach einem projizierten Bauwerk orientiert wurde. Links steht die Schnittfläche orthogonal zu den Diskontinuitäten, deren Orientierung konstant ist. Das geologische Profil erweist sich in diesem Fall als ausreichende Darstellungsmethode. Rechts steht das Profil schief zu den Diskontinuitäten, deren Orientierungen sich im Raum ändern. Die Ungewissheit über die Länge des Schnittstellenbereichs erfasst einen grossen Bauabschnitt.

Raumkomplexität der geologischen Strukturen		
Darstellungsart	gering	hoch
Karte	notwendig	notwendig
Profil	notwendig ausreichend	ausreichend
konventionelles Blockdiagramm	gelegentlich nützlich	unübersichtlich
Serienprofile	gelegentlich nützlich	unübersichtlich
3-D computer-gestütztes Modell	gelegentlich nützlich	notwendig

Tabelle 1. Vor- und Nachteile von Darstellungsmethoden in Bezug auf die Strukturrekomplexität. Mit Ausnahme von einfachen Fällen bietet die 3-D-Modellisation eine korrekte Auswertung von Felddaten

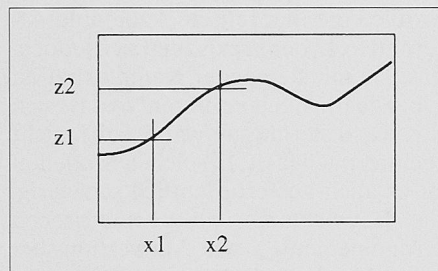


Bild 2. Geologisches Beckenmodell

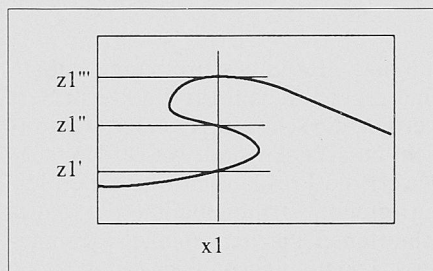


Bild 3. Tektonisches Modell

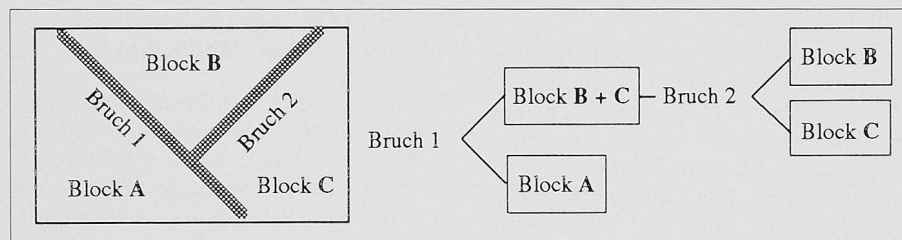


Bild 4. Strukturschema und entsprechendes Schema der Entstehungschronologie. Bruch 1 zerschneidet das Modell in zwei Blöcke (A und B+C). Er ist jünger als Bruch 2, der den Block B+C in die Blöcke B und C zerteilt

deren Blickwinkel, hat ihre vollständige Rekonstruktion zur Folge.

3-D-Modelltypen

Die computergestützte 3-D-Modellierung erzielte grosse Fortschritte im Bauingenieurwesen und in der Architektur. In der Geologie werden diese Verfahren hingegen erst seit kurzem an-

gewandt: die Gründe dafür gibt eine genauere Betrachtung der verschiedenen Modelltypen an, die in drei Kategorien eingeteilt werden können:

- Die Modelle vom Typ CAD benutzen mathematische Funktionen, mit denen mehr oder weniger komplizierte Formen beschrieben werden können. Sie sind im allgemeinen aber ungeeignet für die Behandlung von x-beliebigen geologischen Formen.

Die CAD-Modelle beinhalten eine extreme Vereinfachung der geologischen Verhältnisse, die bei der Bau-durchführung gefährlich werden kann.

- Die «geologischen Beckenmodelle» erlauben eine räumliche Abbildung von Volumen, die von in zwei Dimensionen interpolierten Flächen begrenzt werden. Dieses Vorgehen ist nur möglich, wenn normalliegende Faltenschkel vorliegen (Ablagerungs- und Erdölbecken), so dass die Variable z in die (x,y) -Ebene projiziert werden kann (Bild 2).
- Wirklich dreidimensionale «tektonische Modelle». Wenn die geologische Struktur überkippte Schenkel und/oder Störungen aufweist, drängt sich eine 3-D-Interpolation auf, um mehrere Werte für z in derselben (x,y) -Ebene erheben zu können. Es wird ein Raum (x, y, z, p) berechnet, wobei p einer Eigenschaft einer gegebenen, geologischen Formation entspricht (Bild 3).

Für die Bearbeitung dieser häufig im alpingeologischen Umfeld anzutreffenden Fälle wurde das Graphikprogramm Earth Vision™ von der Firma Dynamic Graphics, Inc. (Alameda [CA], USA) in Zusammenarbeit mit dem Laboratoire de géologie de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (Geolep) entwickelt. Es weist folgende Hauptcharakteristiken auf:

- eine wirkliche 3-D-Interpolation, die die Darstellung von beliebig komplizierten Strukturen erlaubt,
- Berechnungen von Schnittflächen nach den Ablagerungs- und Erosionsregeln,
- Fusion von Modellen mit verschiedenen Variablen (Bild 6). Auf diese Weise lässt sich gleichzeitig ein geologisches mit einem weiteren Modell mit einer anderen Variablen wie Temperatur, Druck, Widerstand usw. visualisieren.
- Kontrolle der geologischen Strukturen, indem der Anwender zwischen den Profilen Korrelationspunkte bestimmt (z. B. bei Faltenachsen).

Prinzip der entwickelten Methode

Die Methode ist für komplexe, geologische Formen konzipiert worden, was sie klar von den CAD-Werkzeugen unterscheidet. Der Verfahrensablauf ist der folgende:

- **Erster Schritt:** Digitalisierung jeder strukturellen Fläche s.l. (geologische Grenz- und Störfächen, Topographie). Für 2-D-Flächen (z.B. Topographie) Digitalisierung mit anschliessender 2-D-Interpolation.

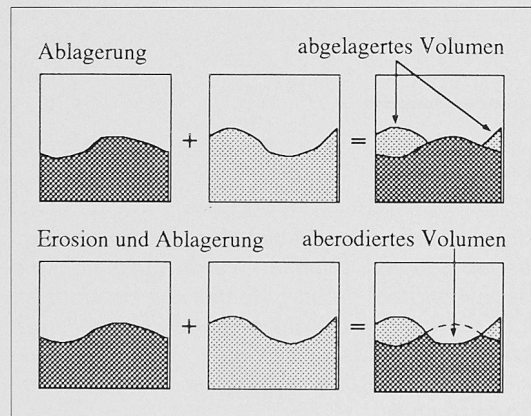


Bild 5. Profil der häufigsten geometrischen Beziehungen zwischen geologischen Formationen, die nach den Schnittflächenregeln in das Modell übertragen wurden. Ablagerungen werden mit Deckflächen, Erosion und Ablagerung mit Schnitt- und Deckflächen dargestellt

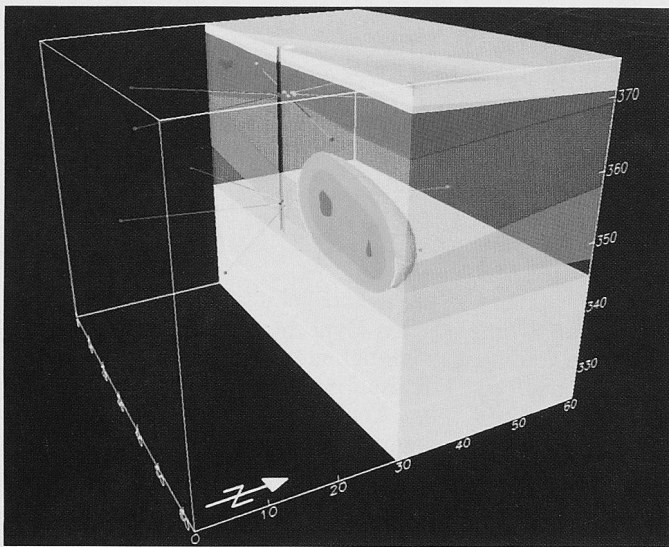


Bild 6. SPEOS: Eine Versuchsanlage zur Wärmespeicherung in Grundwasserleitern. Das Modell illustriert die Fusion von zwei Variablen (Geologie und Temperatur). Die transparenten Aquiferhorizonte erlauben die simultane Darstellung der «Wärmeblase» für $\Theta > 38^\circ\text{C}$. Deutlich erscheint die ostwärts gerichtete Verlagerung bezüglich des Schluckbrunnens

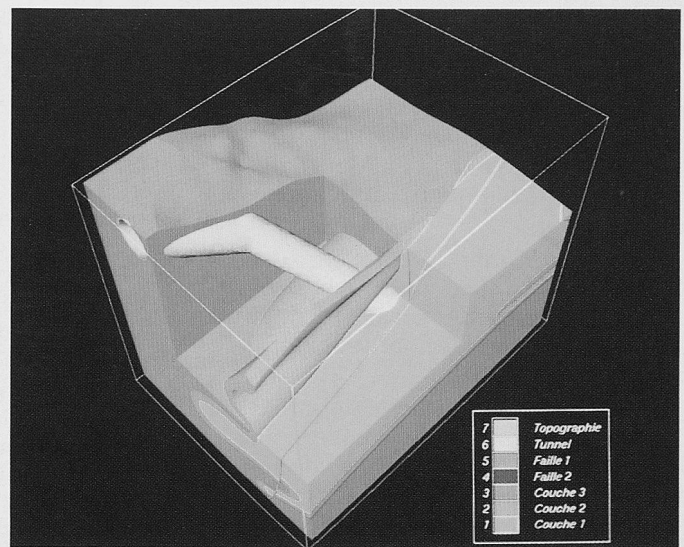


Bild 9. Fiktiver Tunnel im Alpengebiet. Anwendung der «chair mode» mit Ausnahme der Schicht 2 und des Tunnels. Objekte auf der topographischen Oberfläche wurden weggelassen

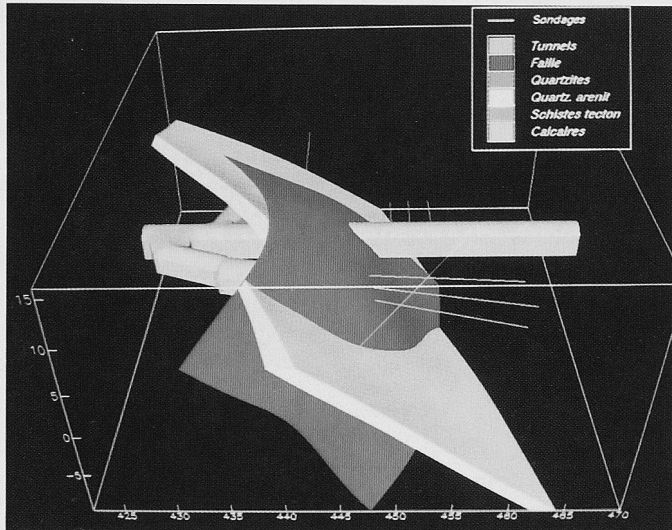


Bild 7. Drotzé-Modell (Cleuson-Dixence) zur Optimierung der Spritzbetoninjektion in eine Sprödgesteinszone

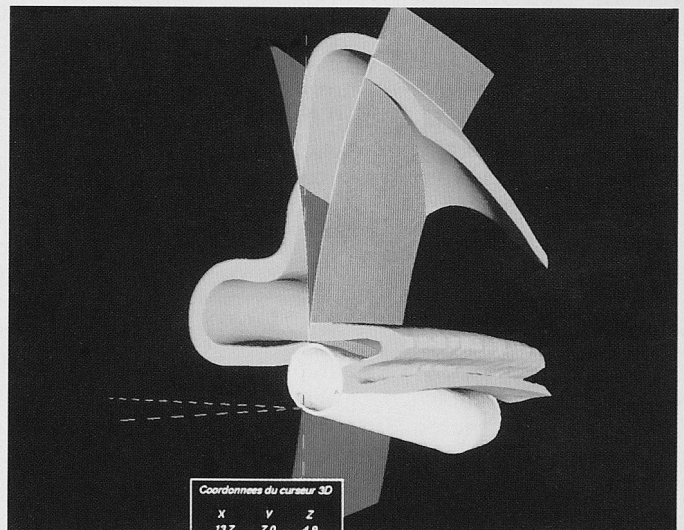


Bild 10. Fiktiver Tunnel im Alpengebiet. Der dreidimensionale Cursor gibt die genauen Koordinaten der Schnittstelle der beiden Störungen mit dem Tunnel an

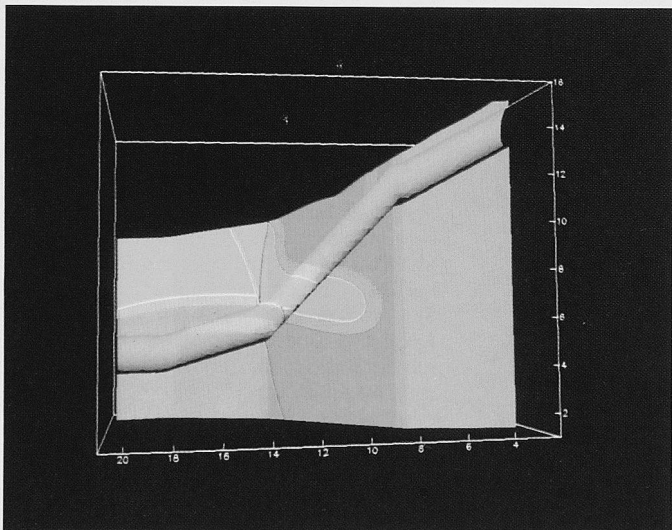


Bild 8. Fiktiver Tunnel im Alpengebiet. Profilschnitt schief zur Tunnelachse. Deutlich zu erkennen ist das Schichtfallen bezüglich der Tunnelneigung

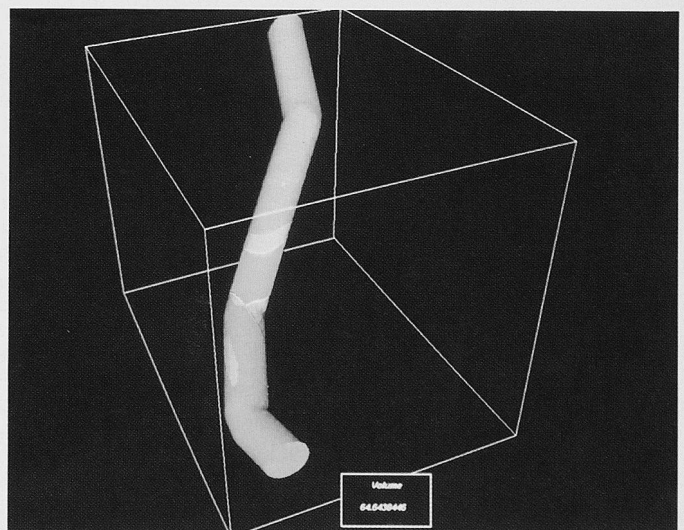


Bild 11. Fiktiver Tunnel im Alpengebiet. Ein Beispiel für interaktive Volumenberechnung in Modelleinheiten; hier das Gesamtausbruchsvolumen

Für 3-D-Flächen Digitalisierung der Profilschnitte, Einfügen von Korrelationspunkten, Interpolation zwischen den Profilen (linear oder «cubic splin») und 3-D-Interpolation (quadratisch). Dieser Flächentyp stellt im Modell die Isofläche $p=0$ eines fiktiven Merkmals dar.

☐ **Zweiter Schritt:** Definition der Störungsflächen und ihrer geometrischen Beziehungen zueinander unter Berücksichtigung der bruchtektonischen Ereignisabfolge.

☐ **Dritter Schritt:** Interaktive Konstruktion der stratigraphischen Sequenz im Innern jedes Blockes. Im Falle von Intersektionen muss für jede Fläche die Beziehung zu den anderen Flächen angegeben werden. Insbesondere sind folgende, in Bild 5 dargestellte Beziehungen verfügbar:

☐ **Vierter Schritt:** Berechnung des ganzen Modells mit Hilfe eines 3-D-Rasters. Das Bauwerk wird dabei entweder wie eine geologische Formation (Volumendarstellung) oder als Linien, Röhren und Flächen dargestellt.

☐ **Fünfter Schritt:** Eventuell Fusion mit einem Modell, das eine andere Eigenschaft (Widerstand, Temperatur, Konzentration usw.) verkörpert und sich aus einer 3-D-Interpolation ergibt (Bild 6).

Anwendungsbeispiele von Untertagebauwerken

Das oben beschriebene Verfahren hat sich bereits bei zahlreichen Anwendungen als nützlich erwiesen. Erwähnt seien die Bereiche der Realisierung von Untertagebauten (Bsp.: Cleuson-Dixence, Bild 7), der Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra), der Quartär- und Hydro-

geologie, der Geothermie (Pilotprojekt SPEOS, Bild 6), der Rutschungen (Autobahn N9) und der Strukturgeologie [1]. Wir stellen im Anschluss dieses Artikels ein Modell vor (Bilder 8 bis 11), das repräsentativ ist einerseits für die Schwierigkeiten, die sich bei einem Tunnelvortrieb in einem alpingeologischen Umfeld ergeben können, andererseits für den Beitrag der beschriebenen Methode bei der Realisierung. Die Intersektion des Bauwerkes mit den Strukturelementen erscheint ebenso klar wie die kritischen Bereiche. Das Modell erlaubt, seine eigenen Ungewissheiten abzuschätzen und fördert die Ausarbeitung von neuen Bauvarianten.

Warum werden diese Methoden bei Untertagebauten angewendet?

Modelle schaffen keine neuen Daten, sondern werten sie auf. Sie erlauben eine effiziente Auswahl von zusätzlichen Abklärungsbereichen und helfen bei der Formulierung und Kritik von Hypothesen. In dieser Hinsicht kommt die hier beschriebene Methode in verschiedenen Phasen eines Bauwerkes zur Anwendung:

☐ Bei der Vorstudie lassen sich auf einfache Art verschiedene Varianten der Linienführung in demselben geologischen Modell plazieren. Dieses dient ebenso der Ergänzung von Ausführungsunterlagen und der Projektpräsentation in der Öffentlichkeit oder vor Drittpersonen (Umweltverträglichkeitsprüfungen usw.).

☐ Im Ausführungsprojekt erlaubt die 3-D-Simulation, Irrtümer aufzudecken, die in zwei Dimensionen nur schwierig zu erkennen sind. Sie ist unerlässlich für das Erfassen von komplizierten Struk-

turen und beim Testen von geometrischen Hypothesen, deren etwaige Unstimmigkeiten sich nicht aus 2-D-Modellisationen ergäben. In diesem Stadium kommen auch interaktive Volumenberechnungen von komplexen Körpern hinzu, wie sie für Ausbruchklassen gebraucht werden.

Inhaltsübersicht

Einleitung

1. Teil, die SIA-Norm 118: Der Schweizerische Ingenieur- und Architekten-Verein (SIA). Die SIA-Norm 118

Literatur

- [1] Mayoraz, Raphaël: Modélisation et visualisation infographiques tridimensionnelles de structures et propriétés géologiques. Dissertation Nr. 1127 an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Lausanne (ETHL), 1993.

☐ Während der Ausführungsphase dient das Modell als Entscheidungshilfe, indem es problemlos an den gegenwärtigen Stand der Bauarbeiten angepasst werden kann. Daneben können simultan Volumenparameter wie Druckfeld, Widerstand, Temperatur usw. visualisiert werden.

☐ Bei der Baudurchführung gesammelte Daten können in einer mit dem Modell verbundenen Datenbank gespeichert werden. Die infographische Archivierung ist zuverlässig, schnell und benutzerfreundlich.

Die zusätzlichen Entwicklungskosten für ein effizientes Modell sind minim im Vergleich zu dem Gewinn, den eine optimale Auswertung der aufwendig erhobenen geologischen Daten mit sich bringt.

Adressen der Autoren: Dr. Laurent Tacher, Geolep-DGC, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), 1015 Lausanne, und Dr. Raphaël Mayoraz, Dynamic Graphics, Inc. Atlantic avenue 1015, Alameda 94501 (CA), USA.

Bücher

Mängel- und Sicherungsrechte des Bauherrn im Werkvertrag

Zürcher Studien zum Privatrecht, Band 110. Von Annette Lenzlinger Gadiant. 254 S., brosch., Preis: Fr. 52.-. Schulthess Polygraphischer Verlag, Zürich 1994. ISBN 3-7255-3187-0.

Zunächst nimmt die Autorin Stellung zur Rechtsnatur der SIA-Norm 118, zur Problematik der Inhalts- und Geltungskontrolle und zur Rangordnung widersprüchlicher Vertragsbestimmungen. Der zweite Teil befasst sich mit der Abnahme des Werkes und der Mängelhaftung des Unternehmers als Voraussetzungen für die Entstehung und den Umfang der Sicherungsrechte.

Die SIA-Norm 118 erhält im Gegensatz zum OR spezielle, die Sicherstellung nach der Ab-

nahme betreffende Regeln. Das Verhältnis zu OR 82 verdient unter diesen Umständen im Rahmen der SIA-Norm 118 eine eingehende Untersuchung. Bei den gebräuchlichsten Erscheinungsformen dieser vereinbarten Sicherstellung, der Bürgschafts- und Garantiever sicherung, wurde ein besonderes Augenmerk auf die Beziehung zwischen den beteiligten Parteien (Bauherr, Unternehmer, Versicherung) und die Dauer der gebräuchlichsten Sicherheitsleistungen gelegt. Zum Schluss des dritten Teils wird die in der SIA-Norm 118 erwähnte, aber nur auf Grund einer zusätzlichen Vereinbarung zwischen den Parteien anwendbare Möglichkeit der Bargarantie bearbeitet.

2. Teil, Abnahme des Werkes und Mängelrechte des Bauherrn: Abnahme des Werks. Mängelrechte des Bauherrn

3. Teil, Sicherungsrechte des Bauherrn nach der Abnahme: Möglichkeiten der Sicherung bei Bauwerkverträgen ohne Einbezug der SIA-Norm 118. Möglichkeiten der Sicherung bei Bauwerkverträgen unter Einbezug der SIA-Norm 118. Die SIA-Norm 118 und das Rückbehaltungsrecht gemäss OR 82. Bürgschaft, Bürgschafts- und Garantiever sicherung im Sinne von SIA-Norm 118 Art. 181 und 182. Bargarantie gemäss SIA-Norm 118 Art. 182

4. Teil, Zusammenfassung: Zusammenfassung der Unterscheidungsmerkmale zwischen dem OR und der SIA-Norm 118 im Bereich der Mängel- und Sicherungsrechte des Bauherrn im Werkvertrag.