Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 95 (1977)
Heft: 42

Artikel: Das Tunnelkostenmodell - ein Verfahren zur Berechnung der Baukosten und Bauzeit von Tunneln in Fels
Autor: Einstein, Herbert H. / Moavenzadeh, Fred
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-73472

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: 09.07.2025

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

95. Jahrgang Heft 42 SCHWEIZERISCHE BAUZEITUNG 20. Oktober 1977

HERAUSGEGEBEN VON DER VERLAGS-AKTIENGESELLSCHAFT DER AKADEMISCHEN TECHNISCHEN VEREINE, 8021 ZÜRICH, POSTFACH 630

Das Tunnelkostenmodell – ein Verfahren zur Berechnung der Baukosten und Bauzeit von Tunneln in Fels

Von **Herbert H. Einstein** und **Fred Moavenzadeh**, Cambridge

Der *Untertagbau* ist nicht nur durch *hohe absolute Baukosten* und *lange Bauzeiten* gekennzeichnet, sondern vor allem auch durch *häufige und grosse Kosten- und Zeitüberschreitungen.* Der Grund für die Kosten- und Zeitabweichungen liegt zum grossen Teil in den Ungewissheiten der Baugrundverhältnisse und in Streuungen der Vortriebsleistungen, die auch bei bekanntem Baugrund auftreten. Da der Kubikmeterpreis zwischen extremen Baugrundverhältnissen um das fünf- bis zehnfache variieren kann, ist die Konsequenz unvorhergesehener Baugrundverhältnisse schwerwiegend. Diese Konsequenzen werden zusätzlich verschlimmert durch die hohen Investitionskosten des Unternehmers, die eine Anpassung an die Baugrundverhältnisse durch Baumethodenänderungen kostspielig und langwierig machen. Zeitüberschreitungen können bei stark fluktuierenden Arbeits- und Materialmarktlagen zu zusätzlichen Kostenüberschreitungen führen.

Diese Ungewissheiten, die zu Streuungen der Baukosten und -zeiten führen, können mit neuen Vorhersagemethoden *unter Umständen* verringert aber nicht ausgeschaltet werden; was aber geändert werden kann ist deren Berücksichtigung in der Kosten- und Zeitberechnung. Zurzeit werden die Ungewissheiten vor allem *intuitiv und wenig detailliert* berücksichtigt. Es ist kaum möglich, einen Begriff zu erhalten wie zum Beispiel Kosten und Zeitwerte einer Offerte im Verhältnis zur möglichen Streuung liegen. Faktoren, welche die grösste Auswirkung auf die Streuung haben, können nur ungefähr bestimmt werden. Die Empfindlichkeit mit der verschiedene Baumethoden auf diese Ungewissheiten reagieren, ist schwierig abzuschätzen. Nicht zuletzt ist es auch kaum möglich, zu bestimmen, wie die Ungewissheiten am wirkungsvollsten, zum Beispiel durch zusätzliche geotechnische Erkundungen verringert werden können.

Ein weiterer Nachteil der gegenwärtigen Baukosten- und Zeitberechnungen ist die *Beschränkung im Variantenstudium:* die Komplexität der Projekte erlaubt in der Regel nur eine kleine Anzahl detaillierter Variantenstudien, betreffe dies nun die Lage- und Bemessungsvariantenstudien des Ingenieurs oder die Baumethodenvariantenstudien des Unternehmers.

Das in diesem Artikel beschriebene Tunnelkostenmodell ist ein auf Computeranwendung beruhendes Verfahren, das die oben erwähnten Beschränkungen in der Erfassung der Ungewissheiten und im Variantenstudium weitgehend ausschaltet. Es wurde in den vergangenen drei Jahren am *Massachussetts Institute of Technology* (MIT) im Rahmen des Programmes *«Research Applied to National Needs»* (RANN) der *National Science Foundation* entwickelt.

Aufbau

Das Tunnelkostenmodell ist ein stochastisches Modell des Tunnelbauvorganges; es besteht aus *drei Submodellen:* dem *Geologiesubmodell,* dem *Bausubmodell* und dem *Tunnelsimulator.* Das erste formt die vorhandenen geologischen Interpretationen in eine technische und probabilistische Beschreibung der Tunnelgeologie um. Das Bausubmodell berechnet Vortriebsleistungen und Kosten, indem es den Bauvorgang für die verschiedenen geologischen Verhältnisse simuliert. Der Tunnelsimulator schliesslich produziert eine Anzahl verschiedener geologischer Längenprofile auf Grund der Angaben des Geologiesubmodells; er simuliert dann den Bauvorgang durch jedes dieser Profile unter Verwendung der im Bausubmodell berechneten Vortriebsleistungen und Kosten. Der Tunnelsimulator berechnet dann für jedes geologische Längenprofil die Gesamtkosten und -zeiten.

Vollständigkeitshalber sei erwähnt, dass neben dem hier beschriebenen Modell andere auf Computeranwendung beruhende Tunnelkostenmodelle bestehen: *Harza-Modell* (1970) und *GRC-Modell* (1971). Beide berücksichtigen aber die Ungewissheiten nicht und lassen im Falle des Harza-Modells auch keine detaillierten Eingabewerte zu.

Das Geologie-Submodell

Zweck

Das Geologiesubmodell hat die geologischen Zustände in Form von geologischen Parametern, welche die Geologie mit den baulichen Konsequenzen verbinden, auszudrücken. Es hat ausserdem die Ungewissheit in der Kenntnis der Baugrundverhältnisse in *quantitativer* Weise auszudrücken.

Geologische Parameter

Die geologischen Parameter für das Tunnelkostenmodell wurden auf Grund folgender Kriterien gewählt:

Quantitativer Charakter: da die baulichen Konsequenzen quantitativ (Zeiten, Materialmengen) auszudrücken sind, müssen die geologischen Parameter mit den quantitativen Konsequenzen in Beziehung gesetzt werden.

Vorhandene Korrelationen zwischen Parametern und baulichen Konsequenzen (z.B. Korrelation zwischen Klüftung und Ausbau): solche Korrelationen können entweder allgemein zugänglich, das heisst der technischen Literatur entnommen sein, oder sie stellen nur dem Gebraucher zugängliche Erfahrungswerte dar.

Das Tunnelkostenmodell erlaubt jeden beliebigen Parameter zu gebrauchen, solange diese Kriterien erfüllt sind. Für die hier beschriebene Version des Tunnelkostenmodells wurden sieben in Tabelle 1 aufgeführte Parameter gewählt. Jeder Parameter ist in zwei bis fünf Bereiche aufgeteilt, die zusammen mit den wichtigsten baulichen Konsequenzen ebenfalls in Tabelle 1 enthalten sind.

Einige Bemerkungen sind zu den gewählten Parametern notwendig:

Die *Lithologie* hat nur wenige direkte bauliche Konsequenzen wie etwa die Abnützung von Bohrköpfen in Abhängigkeit des Quarzgehaltes. Der Parameter Lithologie dient vor allem als Leitparameter bei der Beschreibung der Geologie.

Die *Klüftung* wird mit *Deeres* (1969) RQD beschrieben. Die Bereiche lassen sich je nach der Geologie verschieden definieren (*Vick,* 1973).

Tabelle 1. Geologische Parameter

Parameter	*Parameterbereiche*	*Wichtigste bauliche Konsequenzen*
Lithologie	Tonschiefer Sandstein Kalkstein Schiefer Granit und ähnliche	Maschinenabnützung
Klüftung – RQD (siehe *Deere*, 1968)	hoher mittlerer RQD niederer	Ausbau, Vortriebs-geschwindigkeit, Überprofil
Bedeutende Störungen	Verwerfung starke Verwitterung	Ausbau, Vortriebs-geschwindigkeit, Überprofil
Schieferung	stark geschiefert nicht geschiefert	Ausbau, Überprofil, Vortriebsgeschwindigkeit
Gas	vorhanden nicht vorhanden	Verzögerungen, Ventilationsleistung
Wasserzufluss	hoch niedrig	Pumpen, Injizieren
Einaxiale Druckfestigkeit	sehr hoch hoch mittel niedrig	Vortriebsgeschwindigkeit (insbesondere von Vortriebsmaschinen), Ausbau

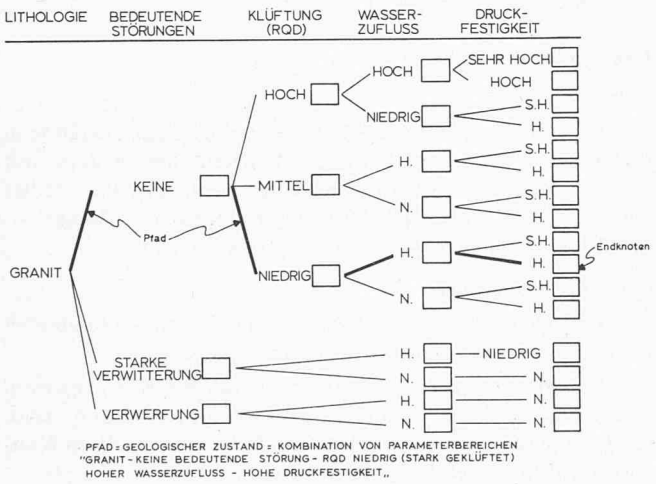


Bild 1. Granit-Parameterbaum

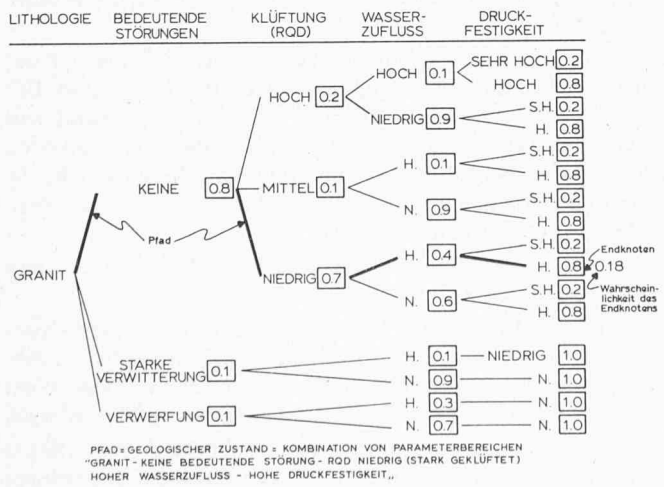


Bild 2. Granit-Parameterbaum mit Wahrscheinlichkeitswerten

Der *Schieferungs*parameter drückt sowohl die Schieferung von metamorphen Gesteinen wie die Schichtung von Sedimentgesteinen aus.

Die Bereiche des *Druckfestigkeits*parameters entsprechen weitgehend der von *Deere* (1968) vorgeschlagenen Klassifizierung.

Es muss an dieser Stelle betont werden, dass die Korrelation Geologie—bauliche Konsequenz von der gewählten Baumethode abhängt: Dieselbe Schieferung kann bei Sprengvortrieb ein wesentlich grösseres Überprofil verursachen als beim Gebrauch einer Tunnelbohrmaschine. Der Wasserzufluss wird als hoch klassifiziert, wenn die an der Tunnelbrust vorhandenen Einrichtungen für die Ableitung nicht genügen und zusätzliche Mittel (Pumpen) beigezogen werden müssen; derselbe Wasserzufluss wird als niedrig klassifiziert, wenn er mit den vorhandenen Mitteln abgeleitet werden kann.

Beschreibung der Geologie

Beim Beschreiben der Geologie müssen der geologische Zustand und seine geometrische Ausdehnung festgehalten werden.

Aus der Diskussion der Parameter wird ersichtlich, dass ein gewisser *geologischer Zustand* (z.B. stark geklüfteter wasserführender Granit) durch eine Kombination von Parameterbereichen (Granit – RQD niedrig – Wasserzufluss hoch – Druckfestigkeit hoch) beschrieben werden kann. Nun kann aber der gleiche Granit auch *wenig* geklüftet (RQD hoch) und *nicht* wasserführend (Wasserzufluss niedrig) sein, oder eine *sehr* hohe Druckfestigkeit aufweisen. Um alle möglichen Zustände in systematischer und übersichtlicher Weise zu beschreiben, wurde das Mittel des *«Parameterbaumes»* angewendet. Bild 1 zeigt den Granit-«Parameterbaum». Ähnliche «Bäume» wurden für die andern vier Lithologien aufgestellt (*Vick* [1973], Tunnel Cost Model [1974]) oder können vom Benützer des Tunnelkostenmodells in beliebiger Weise konstruiert werden. Ein geologischer Zustand kann nun durch einen Pfad, das heisst eine Kombination von Ästen des Parameterbaumes beschrieben werden, was ebenfalls aus Bild 1 ersichtlich ist. Wie später gezeigt wird, eignet sich diese Darstellungsstruktur vorzüglich zur Behandlung geologischer Ungewissheiten. Die geometrische Ausdehnung eines geologischen Zustandes wird dem traditionellen Vorgehen entsprechend durch Unterteilung des Tunnellängenprofils in Segmente «gleicher Geologie» beschrieben.

Quantitative Beschreibung der geologischen Ungewissheit

Ein geologischer Zustand kann höchstens am Ort der Erkundung mit absoluter Sicherheit bestimmt werden. Im allgemeinen sind aber mehrere Zustände, das heisst *verschiedene Kombinationen* von Parameterbereichen möglich; ausserdem ist die geometrische Ausdehnung mit Ungewissheiten verbunden. Geologische Interpretationen berücksichtigen die Ungewissheiten, indem z.B. gesagt wird, dass ein bestimmter Fels stark geklüftet sein wird, dass schwache Klüftung ebenfalls möglich aber weniger wahrscheinlich ist. Der *interpretierende* Geologe bestimmt die Ungewissheiten auf Grund vorhandener Berichte, Oberflächenaufschlüsse, Bohrungen und seiner eigenen Erfahrung. Das geologische Submodell beruht ebenfalls auf dem Gebrauch der *«subjektiven Wahrscheinlichkeit»*. Der einzige Unterschied gegenüber dem traditionellen Vorgehen ist der *Gebrauch von Zahlen* statt von Worten: Der Fels ist mit 70% Wahrscheinlichkeit stark geklüftet. Die Zahlen können wie die Worte intuitiv bestimmt werden, es bestehen aber auch rationale Methoden, wie zum Beispiel die von *Vick* (1973) und die von *Baecher* (1972), worin u.a. die subjektive Wahrscheinlichkeit eingehend diskutiert wird.

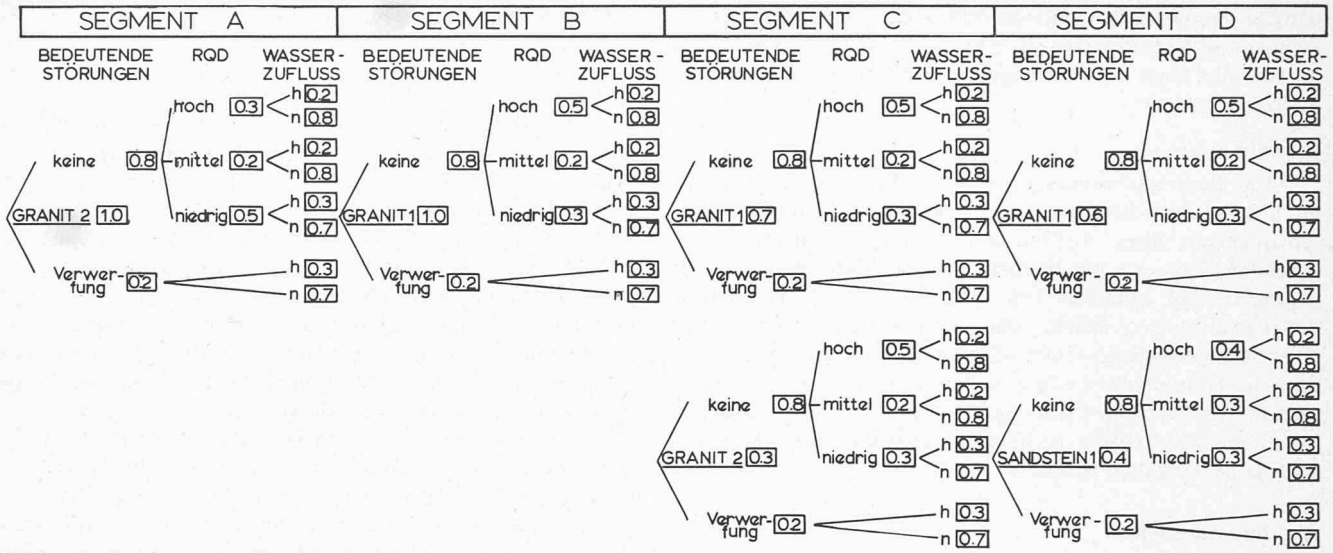


Bild 3. Segmentierung der Tunnelgeologie

Im Zusammenhang mit der Bestimmung von Ungewissheiten werden die Vorteile der Beschreibung der Geologie mit Parametern und vor allem der Strukturierung mit dem Parameterbaum ersichtlich. So ist es wesentlich einfacher, die Ungewissheit eines Parameterbereiches zu schätzen als die aus mehreren Bereichen zusammengesetzten Kombinationen. In Bild 2 ist derselbe Parameterbaum wie in Bild 1, nun aber mit eingesetzten Wahrscheinlichkeitswerten, abgebildet. Die Wahrscheinlichkeit eines geologischen Zustandes kann einfach durch Multiplikation der Wahrscheinlichkeitswerte entlang des entsprechenden Pfades berechnet werden. Die «Endknoten» des Parameterbaumes beschreiben die möglichen geologischen Zustände durch die Pfade, die zu ihnen führen, und die Wahrscheinlichkeit des Eintreffens des entsprechenden Zustandes. (Im Falle von abhängigen Parametern – die Druckfestigkeit zum Beispiel ist meist von der Lithologie abhängig – müssen konditionale Wahrscheinlichkeiten bestimmt werden. Siehe dazu auch *Einstein und Vick,* 1974.) Zur Vereinfachung des Vorgehens wird ein Satz geologischer Zustände und zugeordneter Wahrscheinlichkeiten, wie sie zum Beispiel durch den Parameterbaum in Bild 2 dargestellt werden, *geologische Einheit* genannt. Sobald die Parameter, Parameterbereiche oder Wahrscheinlichkeiten ändern, wird eine neue Einheit bestimmt, was vor allem bei der Segmentierung eine einfachere Darstellung erlaubt wie Bild 3 zeigt, wo bei gleicher Lithologie die Einheit Granit 2 in Segment B eine andere Klüftungswahrscheinlichkeit hat als Einheit Granit 1 in Segment A. In Segment C können beide Einheiten auftreten, aber eher Einheit Granit 2. In Segment D kann eine vollständig verschiedene Einheit Sandstein 1 oder Granit 1 auftreten.

Die Segmentierung und die Zuordnung verschiedener Einheiten zu den Segmenten – wobei in einem Segment mehrere Einheiten auftreten können – erlaubt die geometrische Ungewissheit der Geologie zu beschreiben: die Ungewissheit in der Lage eines Kontaktes zwischen zwei geologischen Formationen kann gemäss Bild 4 behandelt werden. Der Kontakt zwischen den Formationen kann irgendwo im Bereich x—y liegen, es ist aber ungewiss wo. Durch Zuordnung der Einheiten und Wahrscheinlichkeiten des Auftretens gemäss Bild 4 kann ausgedrückt werden, dass sich der Kontakt sicher nicht in A oder F befinden wird, dass er bei A/B iegen kann und am ehesten bei C/D oder D/E liegt.

Ein Problem, das im Zusammenhang mit der geometrischen Ungewissheit gelöst werden muss, ist die *Abhängigkeit von Segmenten:* im Falle des Kontaktes von Bild 4 muss ausgedrückt

Tabelle 2. Markov-Matrix

		Segment C	
		Einheit 1	Einheit 2
Segment B	Einheit 1	60%	40%
	Einheit 2	0%	100%

Tabelle 3. Allgemeine Markov-Matrix

		Einheiten in Segment X (abhängiges Segment)			
		1	2	...	N
	1	P_{11}	P_{12}		P_{1N}
	2	P_{21}	P_{22}		P_{2N}
Einheiten in Segment Y (bestimmendes Segment)		...	...		
					Wahrscheinlichkeit des Auftretens
	M	P_{M1}	P_{M2}		

werden, dass – von links nach rechts gehend – im Falle des Auftretens von Einheit 2 in einem Segment die Einheit 1 in keinem der folgenden Segmente auftreten kann (unter der Annahme, dass die zwei betrachteten geologischen Formationen nicht in Wechsellagerung auftreten). Solche Abhängigkeiten können als *nicht stationärer Markov'scher Einzelschrittprozess* betrachtet werden und lassen sich in einfacher Matrixform darstellen wie in Tabelle 2 gezeigt wird. Ihre Bedeutung lässt sich mit folgenden Worten ausdrücken: Wenn im Segment B Einheit 1 auftritt, dann kann im folgenden (abhängigen) Segment C Einheit 1 mit 60% und Einheit 2 mit 40% Wahrscheinlichkeit auftreten (entspricht den Zahlen in Bild 4), wenn hingegen in B Einheit 2 auftritt, dann kann in C nur Einheit 2 auftreten. Die allgemeine Form der Markov-Matrix ist in Tabelle 3 dargestellt. (Es sei hier noch bemerkt, dass ab-

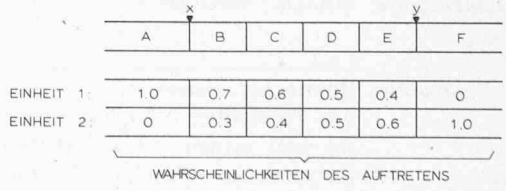


Bild 4. Beschreibung der Ungewissheit eines Kontaktes zwischen zwei geologischen Formationen

hängige Segmente sowohl vor wie nach dem bestimmenden Segment auftreten können. dass sie nicht nebeneinander liegen müssen und dass mehrere Segmente von einem Segment abhängen können.)

Zusammenfassung

Im Geologie-Submodell werden die möglichen geologischen Zustände mittels geologischer Parameter und die Wahrscheinlichkeit ihres Auftretens mittels quantitativer Wahrscheinlichkeitswerte beschrieben. Der Parameterbaum und die Segmentierung erlauben eine übersichtliche Strukturierung dieser quantitativen Beschreibung der Geologie. Das Vorgehen entspricht weitgehend dem traditionellen mit dem Unterschied, dass die Ungewissheiten bewusst erwähnt sind und in Zahlen statt in Worten ausgedrückt werden. Das Anwendungsbeispiel am Ende des Artikels wird einen weiteren Einblick in das praktische Vorgehen geben.

Das Bau-Submodell

Zweck

Das Bau-Submodell hat die Informationen über die Bauvorgänge zu enthalten und die Abhängigkeiten der Bauvorgänge unter sich und von der Geologie festzuhalten. Das Bau-Submodell soll ausserdem die *Streuung der menschlichen und Maschinenleistungen,* das heisst deren Ungewissheit in Betracht ziehen. Mit den vom Bau-Submodell gelieferten Angaben berechnet das Tunnelkostenmodell *Vortriebsleistung und -kosten für verschiedene geologische Zustände.* Diese Berechnung und damit auch die Strukturierung der Information erfolgt – in Anbetracht des zyklischen Charakters des Tunnelvortriebs – je *Zyklus,* das heisst je Abschlagslänge oder je Länge des Bohrmaschinenvorschubs.

Die Informationen und Zusammenhänge, die das Bau-Submodell festhält, lassen sich in die Gruppen

- Bauplanung
- Bauvorgänge und Baumethoden
- Zusammenhänge Geologie — Baumethoden
- Parameter zur detaillierten Beschreibung der Bauvorgänge

gliedern, die in den folgenden Zeilen eingehender diskutiert werden.

Bauplanung

Die Bauplanung betrifft die zeitlichen, distanzmässigen und kostenmässigen Beziehungen zwischen den Hauptphasen des Tunnelbaus, wie Mobilisation, Tunnelvortrieb, Demobilisation, zwischen dem Tunnelbau und dem Bau anderer Bauwerke, wie Lüftungsschächten oder Wasserschlössern, und zwischen dem Tunnelbau und andern externen Einflüssen (Jahreszeit, Arbeitsmarktlage). Ausserdem erlaubt die Bauplanung des Bau-Submodells die Beziehungen zu Zwischenangriffsstellen und zwischen parallelen Vortrieben zu bestimmen.

Baumethode: Vollausbruch mit Sprengvortrieb – vorläufiger Ausbau mit Stahlbögen – Wasserhaltung mit Drainagegräben

Bauvorgang: Vollausbruch mit Sprengvortrieb

Aktivitäten: Bohren – Sprengen – Schuttern

Operationen: Bohrlöcher säubern – Antransport der Spreng- und Zündmittel – Laden – Zündkreis anschliessen und prüfen – Mannschaft und Maschinen zurückziehen – Zünden – Ventilieren

Bild 5. Zusammenhang «Baumethode, Bauvorgang, Aktivität, Operation», dargestellt am Beispiel des Sprengvortriebs

Bauvorgänge und Baumethoden

Eine Baumethode im Bau-Submodell des Tunnelkostenmodells setzt sich aus verschiedenen Bauvorgängen (z.B. Ausbruch und Ausbau) zusammen. Es erlaubt dem Benützer die Bestimmung jeden beliebigen Bauvorganges und die beliebige Zusammenfassung von Bauvorgängen zu Baumethoden. Die Beschreibung von Bauvorgängen und Baumethoden erfolgt mit Netzplänen, wobei ein Bauvorgang aus mehreren Aktivitäten und eine Aktivität wiederum aus mehreren Operationen zusammengesetzt ist. Der Zusammenhang Baumethode – Bauvorgang – Aktivität – Operation ist in Bild 5 für das Beispiel Sprengvortrieb schematisch dargestellt.

Die Netzpläne (siehe auch Tunnel Cost Model, 1974) sind also sehr detailliert und erlauben deshalb vor allem dem Unternehmer, die detaillierten Angaben, die er zu seiner Verfügung hat, voll auszunützen. (Der Benützer des Tunnelkostenmodells, dem weniger detaillierte Unterlagen zur Verfügung stehen, kann auch diese eingeben, wie später gezeigt werden wird.) Die Netzpläne des Tunnelkostenmodells gleichen anderen Netzplansystemen wie z.B. PERT, sie haben aber verschiedene zusätzliche Eigenschaften:

– Die *Ungewissheit,* das heisst die Streuung der Leistungen, kann durch Zuordnung einer Streuverteilung anstatt eines Einzelwertes für die Dauer einer Operation beschrieben werden. Bei PERT z.B. ist eine solche probabilistische Beschreibung nur bei den Aktivitäten, also in wenig detaillierter Weise möglich, was bei den komplexen Ursachen der Streuungen im Tunnelbau unbefriedigend ist.

– Die *Dauer* verschiedener Aktivitäten sind miteinander verbunden; ein vergrössertes Überprofil verursacht längere Schutterungszeiten, grössere Transportleistungen und z.B. einen Mehrverbrauch und eine Mehrzeit beim Spritzbetonausbau.

– Die wichtigste der zusätzlichen Eigenschaften ist die Möglichkeit, die Aktivitäten und die Umgebung, das heisst vor allem die Geologie, miteinander in Zusammenhang zu bringen.

– *Verschiedene Netze* (z.B. verschiedene Baumethoden) können durch ein sogenanntes «Supernetz» miteinander in Beziehung gesetzt werden. Dies ermöglicht die Bauplanung (z.B. die zeitliche oder distanzmässige Beziehung zwischen mehreren Antriffsstellen). Es erlaubt aber auch die Kostensteigerung während der Dauer des Projektes zu berücksichtigen oder mittels «Lernkurven» die Tatsache zu berücksichtigen, dass eine neue Baumethode (z.B. Teilvortrieb) eine gewisse Anlaufzeit braucht, bis zur Erreichung durchschnittlicher Leistungen.

Zusammenhänge Geologie — Baumethoden

Der Benützer des Tunnelkostenmodells betrachtet die geologischen Zustände, die im Geologie-Submodell bestimmt wurden, und legt danach die entsprechenden Baumethoden fest. Eine Baumethode wird normalerweise in mehreren geologischen Zuständen anwendbar sein, weshalb im Bau-Submodell jeder Beschreibung einer Baumethode die geologischen Zustände («Endknoten» des Parameterbaumes) folgen, in denen die Baumethode angewendet wird.

Parameter zur detaillierten Beschreibung der Bauvorgänge

Die oben erwähnten Operationen, aus denen sich die Aktivitäten und damit die Bauvorgänge zusammensetzen, werden durch Parameter beschrieben. Zum Beispiel die Zeit für das Bohren eines Sprengloches wird durch die Penetrationsleistung und die Länge des Bohrloches definiert; die Zahl der Bohrlöcher und die Zahl der Bohrhämmer kommen als weitere Parameter hinzu.

Die Werte vieler dieser Parameter hängen von der Geologie ab. Es ist deshalb für jeden dieser Parameter notwendig, sowohl die numerischen Werte wie auch die geologischen Zustände (Endknoten), für welche die Werte gültig sind, festzulegen (siehe Tabelle 4). Unter den Parametern hat es eine grössere Anzahl, die nicht Einzelwerte sondern *Streuwerte* annehmen können. Die Penetrationsleistung zum Beispiel wird selbst bei konstanten Felsverhältnissen variieren. Es ist deshalb nötig, probabilistische Parameter einzuführen.

Die Parameter, welche die Bauvorgänge im Bau-Submodell beschreiben, lassen sich wie folgt gruppieren:

Probabilistische Parameter
- Zeitparameter (z.B. Zeit zum Laden eines Bohrloches)
- Technische Parameter (z.B. Penetration, Überprofil)

Deterministische Parameter
- Technische Parameter (z.B. Kapazität eines Stollenwagens)
- Verzögerungsparameter (regelmässig und unregelmässig) (z.B. Vorziehen der Lutten, Möglichkeit von Entgleisungen, Unterhaltsarbeiten)
- Kostenparameter

Zum besseren Verständnis dieser Parameter sind noch einige Bemerkungen notwendig:

Bei den *probabilistischen* Parametern gibt der Benützer des Tunnelkostenmodells den optimistischen, den pessimistischen und den wahrscheinlichsten Wert, sowie die gewünschte stochastische Verteilung (normal, β, uniform) an.

Die deterministischen *Verzögerungsparameter* betreffen Ereignisse, die nicht in jedem Zyklus (Abschlagslänge) auftreten. Der Benützer gibt an, in welchen Intervallen diese Parameter auftreten.

Die *Kostenparameter* sind in direkte, indirekte variable und indirekte Festkostenparameter unterteilt. Die *direkten Kosten* werden normalerweise je Zyklus berechnet, wenn es sich um Arbeit, eingebautes Material (z.B. Beton) oder Verbrauchsmaterial (z.B. Sprengmittel) handelt, die mit dem Tunnelvortrieb verbunden sind. Nicht zyklische direkte Kosten sind solche, die zum Beispiel an bestimmten Orten im Tunnel auftreten, wobei hier vor allem an die Kosten von Baumethodenänderungen gedacht ist. Die Installations-, Mobilisations- und Demobilisationskosten fallen in die zwei Kostenkategorien *indirekte Festkosten* (Ankauf einer Einrichtung, die während des Projektes voll abgeschrieben wird) und *indirekte variable Kosten,* wie zum Beispiel Miet- oder Abschreibungskosten, die auf stündlicher oder täglicher Basis berechnet werden. Diese indirekten variablen Kosten werden proportional den Zyklenkosten zugeschlagen. Andere variable indirekte Kosten, die entweder mit der Bauzeit oder den Baukosten ändern, können

Tabelle 4. Zuordnung von Bauparametern zu den geologischen Verhältnissen

Bauparameter	*Werte des Bauparameters*	*Endknoten, denen die Werte zugeordnet sind*			
	3,0 m	Granit	1	4	..
Bohrlochlänge	3,0 m	Sandstein	5	6	..
	4,0 m	Tonschiefer	2	4	..

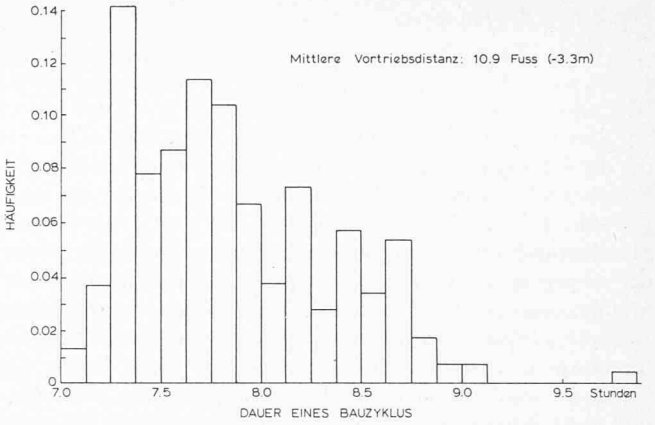


Bild 6. Bauzeit-Histogramm für günstige geologische Verhältnisse

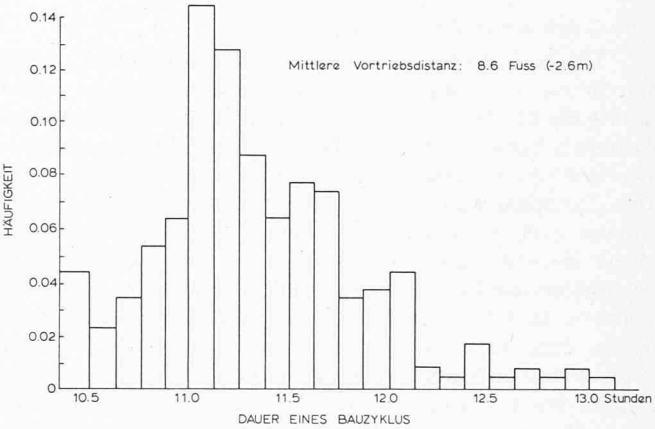


Bild 7. Bauzeit-Histogramm für ungünstige geologische Verhältnisse

ebenfalls berücksichtigt werden. Die Kostenstruktur des Tunnelkostenmodells kann übrigens den Wünschen des Benützers angepasst werden.

Zyklenkosten und -zeiten — Zusammenfassung

Das Tunnelkostenmodell benützt nun all diese im Bau-Submodell eingegebenen und strukturierten Informationen – Bauplanung, Baumethoden und Bauvorgänge, Abhängigkeit von der Geologie, Parameter –, um die Kosten und die Dauer eines Bauzyklus (Abschlagslänge, Tunnelbohrmaschinenvorschub) zu berechnen. Die detaillierten Beschreibungen von Bauvorgängen und die entsprechenden Parameterwerte sind normalerweise nur Unternehmern zugänglich, während Planer und Ingenieure meist nur über aggregierte Vortriebsleistungen und Kosten je Laufmeter für bestimmte geologische Zustände verfügen. Das Tunnelkostenmodell erlaubt ebenfalls die Verarbeitung solcher Informationen, wobei sie in deterministi scher oder probabilistischer Weise eingegeben werden können.

Das Bau-Submodell – wie auch das Geologie-Submodell – dienen zur Eingabe und Strukturierung der vom Benützer zu bestimmenden Werte. Die Berechnung der Gesamtkosten und -zeiten erfolgt mit dem im folgenden Abschnitt beschriebenen Tunnelsimulator.

Der Tunnelsimulator

Der Tunnelsimulator enthält *drei* Simulationsroutinen:
- die Simulation der Bauzyklen für jeweils einen bestimmten geologischen Zustand,
- die Simulation geologischer Längenprofile,
- die Simulation des Vortriebes in den verschiedenen geologischen Längenprofilen unter Benützung der Resultate der zwei obigen Simulationsroutinen.

Simulation der Bauzyklen

In der Bauzyklus-Simulation werden die Kosten und die Dauer des Zyklus für einen bestimmten geologischen Zustand (Endknoten) berechnet. Der Bauzyklus wird simuliert, indem der Simulator einem Pfad durch den Netzplan folgt und dabei die der Geologie entsprechenden Parameterwerte benützt; bei Streubereichen wird in jedem Simulationsdurchgang ein Wert gewählt, so dass bei der üblichen Anzahl (100 oder mehr) Simulationsdurchgängen die Verteilung der benützten Werte der eingegebenen Verteilung entspricht. Das Ergebnis dieser Simulationen sind Dauer- und Kostenhistogramme für einen Bauzyklus (Bild 6). Es muss hier nochmals betont werden, die Streuung in diesen Histogrammen ist nicht durch die Geologie, sondern einzig durch die vorerwähnten Leistungs- und Kostenstreuungen der Bauoperationen bedingt. Hingegen ist der Unterschied zwischen dem Histogramm in Bild 6 und dem in Bild 7 durch die Geologie bedingt.

Simulation der geologischen Längenprofile

Die geologischen Längenprofile werden simuliert, indem der Simulator ein Segment nach dem andern betrachtet, wobei zuerst ein bestimmendes und dann alle von ihm abhängigen Segmente betrachtet werden, bevor zum nächsten bestimmenden Segment weitergeschritten wird. In jedem Segment wählt der Tunnelsimulator mit einem *Monte-Carlo-Simulationsprozess* eine der möglichen Einheiten und dann innerhalb dieser einen der geologischen Zustände. Das Ergebnis eines Simulationsdurchganges ist ein geologisches Längenprofil des Tunnels. In Bild 8 sind drei solcher Profile in vereinfachter Form dargestellt. Bei der üblichen Anzahl von hundert Simulationsdurchgängen oder mehr und der ebenso grossen Anzahl von Profilen, entspricht dann die Häufigkeit, mit der ein bestimmter Zustand in einem bestimmten Segment auftritt, der eingegebenen Wahrscheinlichkeit.

Simulation des Vortriebes

Für jedes der geologischen Profile wird nun der Bau simuliert, indem der Simulator in Schritten, die den Vortriebszyklen entsprechen, das Profil abschreitet. In jedem Zyklus wird anhand des geologischen Profils zuerst der geologische Zustand bestimmt. Mit den für diesen und die entsprechenden Baumethoden berechneten Kosten und Dauerverteilungen (Histogramme), aus denen mit Hilfe des Monte-Carlo-Simulationsprozesses ein Wert gewählt wird, werden für jeden Zyklus Kosten, Dauer und Vortriebsdistanz berechnet. Nach Beendigung eines Zyklus werden diese Werte zu denen der vorigen Zyklen hinzugezählt. Nachdem der ganze Tunnel abgeschritten ist, werden die andern nicht direkt mit dem Vortrieb verbundenen Kosten (und Zeiten) hinzugezählt. Das Ergebnis jedes Simulationsdurchganges ist somit ein *Kosten-Zeitpaar*. Das Gesamtergebnis von mehreren hundert Simulationen bildet ein Streudiagramm (z.B. Bild 9). Das Streudiagramm gibt dem Benützer Gesamtkosten und -zeitwerte und vor allem ein Bild über die Wirkung der Ungewissheiten. Seine Hervorbringung benötigt etwa 10 Minuten Computerzeit, ist also rasch und relativ billig.

Damit ist die Beschreibung des Tunnelkostenmodells abgeschlossen; seine Anwendungsmöglichkeiten werden später beschrieben.

Beispiel aus der Praxis: der Harold D. Roberts Tunnel in Colorado

Im Zuge der Erprobung wurde das Tunnelkostenmodell bisher zur Kosten- und Zeitberechnung von *fünf Tunneln,* die bereits fertiggestellt oder nahe der Vollendung waren, angewendet. Dabei wurden aber einzig die geologischen Angaben, wie sie *vor* dem Bau zur Verfügung standen, verwendet. Die wirklich erzielten Vortriebsleistungen dienten als Vergleichsbasis.

Einer dieser fünf Tunnel, der Harold D. Roberts Tunnel im *Staat Colorado,* soll nun dazu dienen, einige der charakteristischsten Punkte bei der praktischen Anwendung des Modells zu beleuchten. Der Roberts Tunnel ist ein 23,3 Meilen (rund 37,3 km) langer *Wasserstollen* im Wasserversorgungssystem der Stadt Denver. Der Stollen wurde als *Hufeisenprofil* ausgebrochen und dann mit Beton von durchschnittlich 30 cm Stärke zu einem Kreisprofil (Innendurchmesser 3,10 m) ausgekleidet. Bild 10 zeigt die allgemeine Lage des Stollens, Bild 11 einen detaillierten Lageplan und ein Längenprofil. Die Tunnelgeologie, die von *Wahlstrom* (1974) im Detail beschrieben worden ist, besteht aus Sedimentgestein im westlichen Teil, und zwar vor allem aus Tonschiefern und etwas Sand- und Kalkstein. Der westliche Teil ist auch stark gestört. Von besonderem Interesse ist die *Williams Range Verwerfung* (Bild 11), die eine im Tonschiefer (Pierre Shale) liegende Mulde bildet, in die sich ältere Gneise und Granite verschoben haben. Der östliche Teil der Tunnelgeologie besteht – von Westen nach Osten gehend – aus Monzonit, der zum Teil stark porphyritisch und mineralisiert ist, Gneisen und Schiefern in Mischformation, Granit und Amphibolit.

Der Bereich der Williams Range Verwerfung soll nun dazu dienen, das Vorgehen beim Bestimmen der geologischen Verhältnisse zu beleuchten. In Bild 12 sind die geologischen Verhältnisse abgebildet. Einige Bohrungen (DDH 1, 2, 5, 6) geben Aufschluss über die Verhältnisse; es bleiben aber noch einige Ungewissheiten, die in Bild 12 mit den Zahlen 1–4 bezeichnet sind:

1. Es ist nicht sicher, wo die Verwerfung die Tunnelaxe schneidet. Ausserdem ist die Mächtigkeit der gestörten Zone unbekannt.

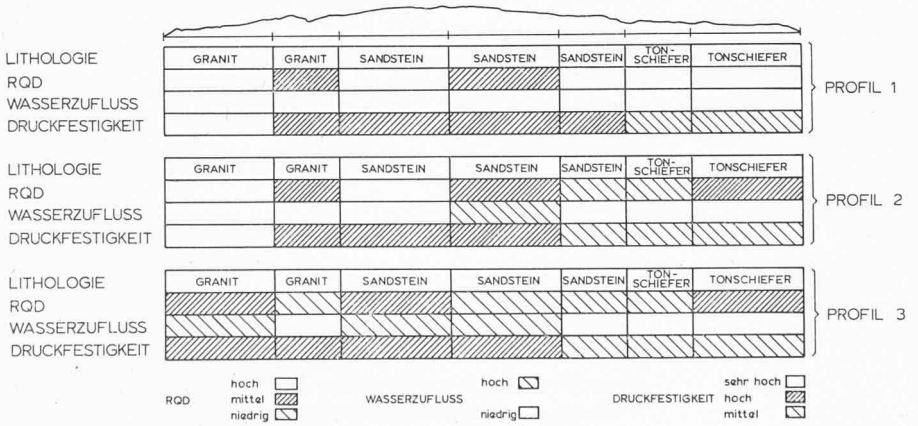


Bild 8. Simulierte geologische Längenprofile

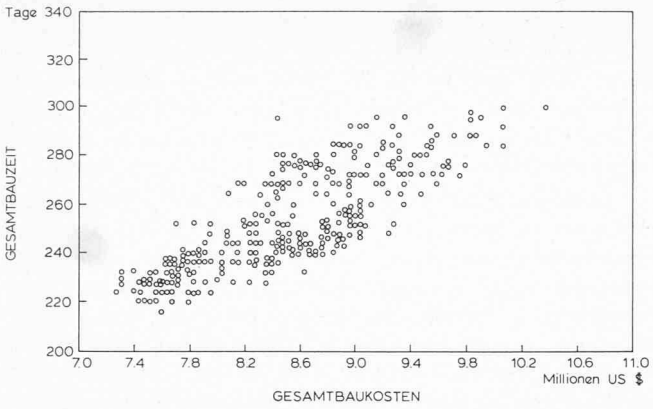


Bild 9. Streudiagramm (Resultat von 300 Simulationen)

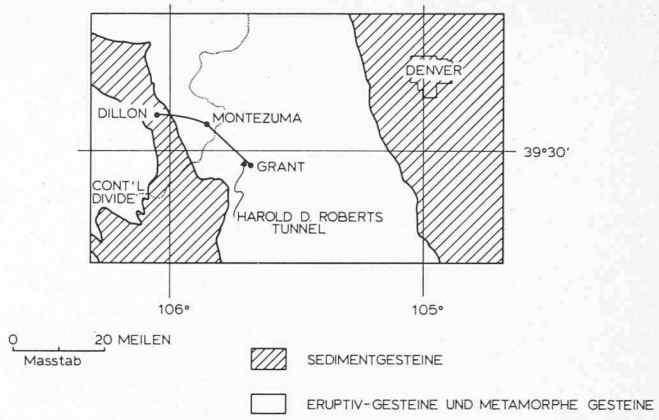


Bild 10. Harold G. Roberts Tunnel in Colorado. Allgemeine Lage

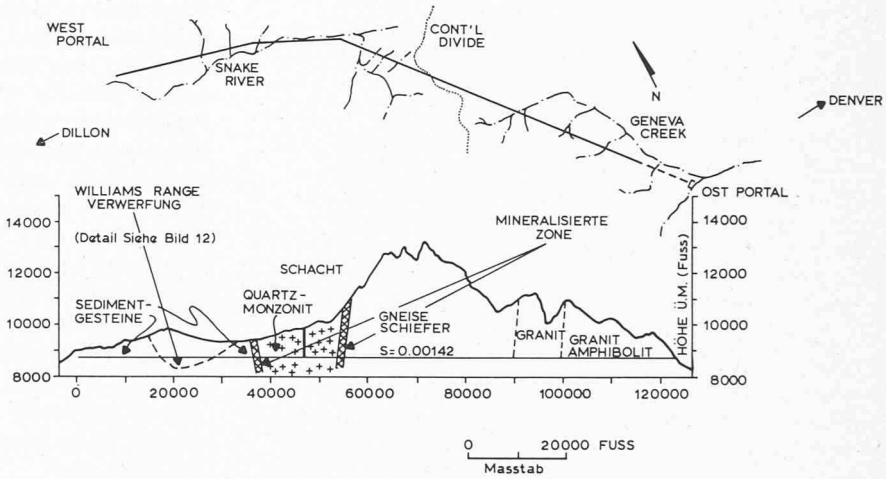


Bild 11. Roberts Tunnel. Detaillierter Lageplan und Längsschnitt

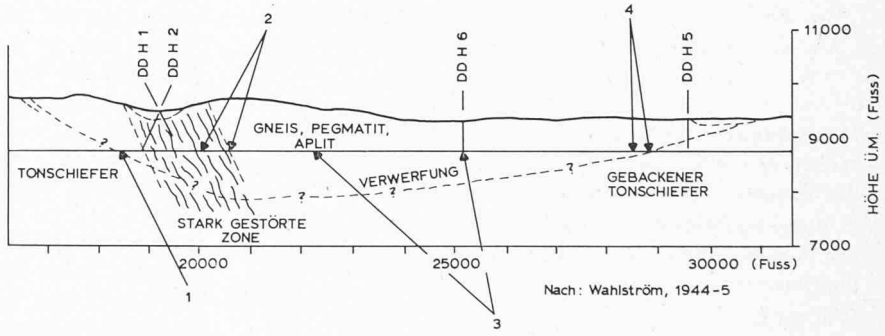


Bild 12. Roberts Tunnel. Abschnitt der «Williams Range»-Verwerfung

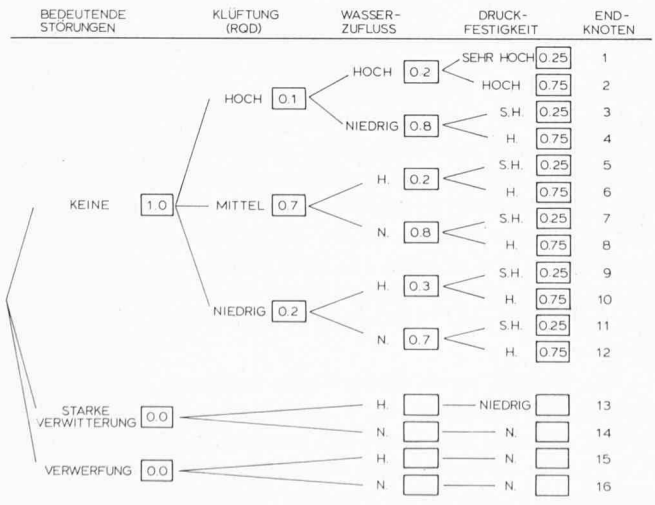


Bild 13. Roberts Tunnel. Parameterbaum Granit 1 (GR 1)

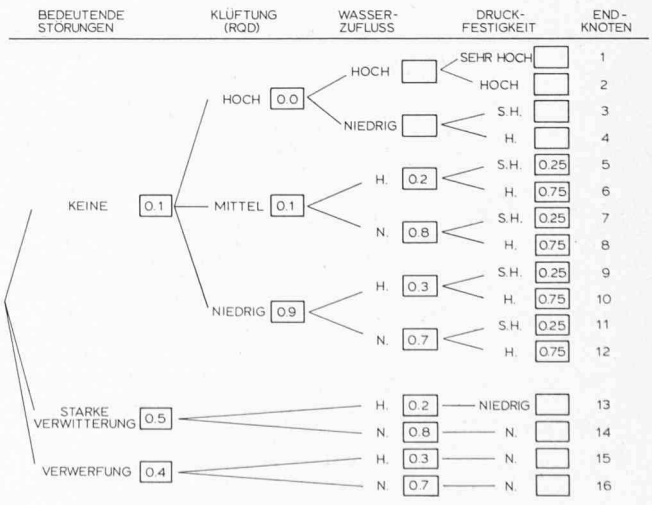


Bild 14. Roberts Tunnel. Parameterbaum Granit 4 (GR 4)

Tabelle 5.

Segment Nr.	Distanzangaben (in Fuss)		Bestimmendes Segment	Zugeteilte Einheiten und Wahrscheilichkeiten
40	179+80	182+30		SP 1 SP 3 GR 1 GR 3 0.100 0.700 0.050 0.150
41	182+30	185+55	40	GR 1 GR 3 SP 3 SP 1 SP 1 1 0.100 0.200 0.600 0.100 SP 3 1 0.000 0.300 0.700 0.000 GR 1 1 0.500 0.500 0.000 0.000 GR 3 1 0.100 0.900 0.000 0.000
42	185+55	188+30	41	SP 3 GR 1 GR 3 GR 3 1 0.000 0.500 0.500 GR 3 1 0.000 0.100 0.900
43	188+30	191+30	42	SP 1 SP 3 GR 1 GR 3 GR 6 GR 3 1 0.000 0.050 0.100 0.750 0.100 GR 3 1 0.000 0.100 0.050 0.750 0.100 SP 3 1 0.000 0.100 0.050 0.750 0.100
44	191+30	206+95		GR 6 1.000
45	206+95	210+80		GR 6 GR 1 GR 3 0.200 0.200 0.600
46	210+80	221+30		GR 1 GR 3 GR 4 0.200 0.300 0.500
47	221+30	231+30		GR 4 1.000
48	231+30	246+80		GR 4 GR 3 GR 1 0.600 0.100 0.300
49	246+80	260+30		GR 4 GR 3 GR 1 0.600 0.100 0.300
50	260+30	270+30		GR 3 GR 1 GR 4 0.400 0.300 0.300
51	270+30	284+30		GR 1 GR 3 0.800 0.200
52	284+30	287+05		GR 1 GR 3 SP 4 0.100 0.800 0.100
53	287+05	289+55	52	GR 1 GR 3 SP 4 SP 2 GR 1 1 0.100 0.200 0.600 0.100 GR 3 1 0.100 0.200 0.600 0.100 SP 4 1 0.000 0.000 0.900 0.100
54	289+55	292+05	53	GR 1 GR 3 SP 2 SP 4 GR 1 1 0.050 0.100 0.100 0.750 GR 3 1 0.000 0.100 0.100 0.800 SP 2 1 0.000 0.000 1.000 0.000 SP 4 1 0.000 0.000 0.100 0.900

2. Die Bohrungen DDH 1 und 2 und Oberflächenaufschlüsse zeigten eine stark gestörte Zone, deren Ausdehnung längs der Tunnelaxe aber ungewiss ist.
3. In Bohrung DDH 6 wurde wenig geklüfteter Fels gefunden. Die Ausdehnung dieser «besseren» Gesteinsverhältnisse ist ungewiss.
4. Wie bei 1.

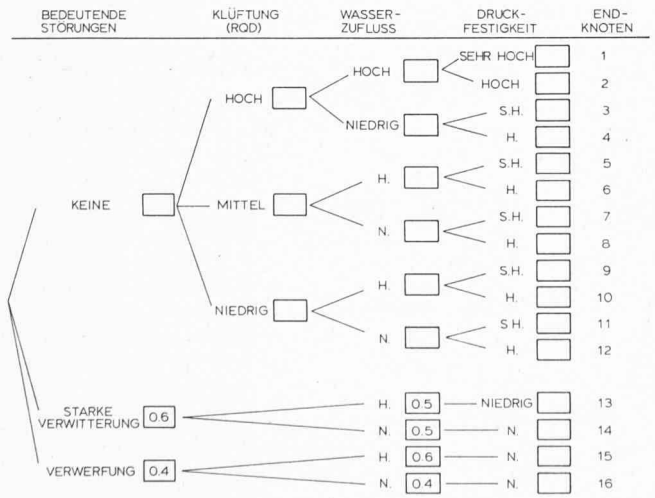


Bild 15. Roberts Tunnel. Parameterbaum Granit 6 (GR 6)

In gleicher Weise werden andere Ungewissheiten entlang des Tunnels identifiziert. Der *1. Schritt* bei der Bestimmung der geologischen Verhältnisse ist demnach die Verwertung aller Unterlagen (Berichte, Karten, Bohrungen, Erfahrung), um ein traditionelles geologisches Längenprofil zu schaffen, in dem Ungewissheitszonen angegeben sind.

In einem *2. Schritt* werden nun die Gesteinsarten näher betrachtet. Im Bereich der Williams Range Verwerfung treten Tonschiefer (Pierre Shale) und gebackene Tonschiefer auf, wobei die letzten geringere Quellerscheinungen und höhere Festigkeiten aufweisen. Die Gneise, Aplite und Pegmatite in der Mulde werden hier der Einfachheit halber als «Granit» bezeichnet. Sowohl Tonschiefer wie «Granit» können wenig geklüftet bis stark geklüftet sein und unterschiedlichen Wasserzufluss aufweisen. Die Unterschiede der Felseigenschaften müssen nun mit der Beschreibung entsprechender Einheiten erfasst werden, wobei in jeder Einheit die Ungewissheit dieser Eigenschaften ausgedrückt werden soll. Dies ist am Beispiel der «Granite» in Bild 13–15 illustriert: Bild 13 beschreibt die Einheit GR 1, den gesunden Granit (keine Verwerfungen, mittelmässig geklüftet (70% mittlerer RQD), mit wahrscheinlich wenig Wasserzufluss (80% niedrig, 20% hoch), und vorwiegend hoher, möglicherweise sehr hoher Druckfestigkeit. In Bild 14 ist GR 4 ein stark geklüfteter und verwitterter Granit dargestellt: die Wahrscheinlichkeit, dass der Fels stark gestört (Verwerfung 40%, Verwitterung 50%) ist, ist sehr hoch; der Wasserzufluss aber wird immer noch als vorwiegend niedrig angenommen. Im Extremfall GR 6 (Bild 15) wird vollständig gestörtes Gestein mit 40–60% Wahrscheinlichkeit hohen Wasserzuflusses angenommen.

Der *3. Schritt,* der beim praktischen Vorgehen weitgehend gleichzeitig mit dem 2. Schritt vollzogen wird, besteht aus der Segmentierung und der Zuordnung von Einheiten zu den Segmenten.

Die Segmente im Bild 16 drücken nun z.B. die Ungewissheit in Lage und Ausdehnung der Verwerfung (Segmente 40–43, 52–54) oder in der Ausdehnung der stark gestörten Zone (Segmente 44, 45) aus. Tabelle 5 enthält die Zuordnung der Einheiten und ihrer Wahrscheinlichkeiten zu den Segmenten. In Segment 40 wird z.B. angenommen, dass Tonschiefer (SP 1 oder 3) mit 80% Wahrscheinlichkeit, Granit (GR 1 oder 3) mit 20% auftritt. Segment 41 hängt von Segment 40 ab und die Markov-Matrix zeigt, dass beim Auftreten von Granit in Segment 40 kein (0%) Tonschiefer in 41 auftreten kann. In ähnlicher Weise hängt Segment 42 von 41 und 43 von 42 ab, wobei in 43 berücksichtigt ist, dass dort der sehr stark gestörte Granit GR 6 auftreten kann.

Aufgrund dieser geologischen Eingaben werden – wie zuvor beschrieben – geologische Profile simuliert. In Bild 17 sind drei simulierte Profile für den Abschnitt der Williams Range Verwerfung dargestellt. Profil 1 zeigt einen günstigen Fall mit wenigen, stark gestörten Zonen. Profil 3 ist ein extrem ungünstiger Fall, jedes Segment ist entweder stark gestört oder weist einen starken Wasserzufluss oder beides auf. Profil 2 ist ein mittlerer Fall. Die drei Profile veranschaulichen ausserdem, dass z.B. in Segment 44 die Wahrscheinlichkeit, stark gestörten Fels anzutreffen, sehr hoch ist, da in jeder Simulation eine Verwerfung simuliert wird. (Es sei in Erinnerung gerufen, dass das Auftreten der geologischen Zustände in den Simulationen den eingegebenen Wahrscheinlichkeitswerten entsprechen muss.)

Es wurden *sechs Baumethoden* bestimmt, die, je nach geologischen Verhältnissen, angewendet werden. Die Unterschiede zwischen den Methoden bestehen in Abschlagslängen (1–3 m), Anzahl Bohrlöchern, Ausbauarten (kein Ausbau oder Stahlbögen in Abständen zwischen 1 und 1,50 m), Wasserhaltung mit Pumpen oder vorgängigen Injektionen. In Bild 18

ist ein Teil der Parameterliste wiedergegeben, welche die Parameter für die Installation von Stahlbögen in den Methoden 4, 5, 6 festhält: Einbauzeiten (T-SET-INSTALL) für die Bögen können von 12 bis 85 Minuten variieren (Probabilistischer Parameter). Für den Verzugseinbau (T-LAG-SS) kann die Zeit zwischen 3 und 15 Minuten variieren. Die Abstände der Stahlbögen (SET-SPACING) und deren Kosten (C-SET) sind von der Geologie abhängig, was mit der Zuordnung von Endknoten in der letzten Kolonne geschieht. (Die Endknotennumerierung entspricht der von Bild 13–15.)

Das Resultat der Bauzeiten und -kostenberechnung für den Roberts-Tunnel ist das Streudiagramm in Bild 19. Die mittleren Kosten betragen 29,5 Millionen Dollar; da dies nur die direkt mit dem Vortrieb ohne Betonausbau verbundenen *Kosten* sind, ist die Übereinstimmung mit den wirklichen Gesamtkosten von 45 Millionen Dollar *relativ* gut. Die *mittlere Bauzeit* beträgt 1287 Tage, was mit der wirklichen Bauzeit von 900 Tagen *nicht gut* übereinstimmt. Zu dieser Diskrepanz geben die Vortriebs-Zeitdiagramme der Bilder 20 und 21 interessante Hinweise: Der Stollen wurde an vier Angriffsstellen vorgetrieben. Bild 20 zeigt das wirkliche Vortriebsdiagramm sowie eine optimistische und eine pessimistische Simulation des Tunnelkostenmodells für die westliche Hälfte, Bild 21 dasselbe für die östliche Hälfte. Die Übereinstimmung zwischen Wirklichkeit und Simulation ist im westlichen Teil gut, im östlichen dagegen sind die Simulationen zu pessimistisch. Der Grund hierfür sind die geologischen Interpretationen: im Westen, wo die Überlagerung gering ist und Bohrungen abgeteuft worden waren, war die geologische Information umfassender und die Interpretation offensichtlich zutreffender als im Osten, wo bei einer Gebirgsüberlagerung bis zu 1500 m Mächtigkeit und keinen Bohrungen die geschätzten von den wirklichen Zuständen wesentlich abwichen. Dies zeigt, dass die Resultate des Tunnelkostenmodells – wie auch das traditionelle Vorgehen für Baukosten und -zeitschätzungen – nur so gut wie die Eingabewerte sein können. Die Möglichkeit, Ungewissheit einzubeziehen und vor allem zu zeigen, was für Konsequenzen diese Ungewissheiten haben, ist aber ein gewichtiger Vorteil des Modells und konnte an diesem Beispiel gezeigt werden.

Anwendungsmöglichkeiten

Die *Flexibilität* und *Schnelligkeit* des Tunnelkostenmodells ermöglichen verschiedenartige Anwendungen über die hier eine Übersicht gegeben werden soll.

Anwendungen durch den Bauunternehmer

Offertvorbereitung: Die mit dem Tunnelkostenmodell berechenbare Baukosten und -zeitstreung ermöglichen dem Unternehmer, das Risiko infolge geologischer Ungewissheiten und Leistungsstreuungen besser abzuschätzen. Kritische Tunnelabschnitte oder empfindliche Bauvorgänge können identifiziert werden. Es können eine grosse Zahl alternativer Baumethoden und Bauvorgänge untersucht werden. Das Modell liefert auch Materialauszüge.

Arbeitsvorbereitung: Detaillierte Bauplanung und Studien einer beliebigen Zahl alternativer Bauvorgänge einschliesslich der Auswahl der Installationen können ausgeführt werden.

Baukontrolle: Die wirklich erzielten Leistungen können mit den geschätzten verglichen und abgeändert werden. Dieses Vorgehen entspricht der normalen Netzplananwendung, wobei die früher erwähnten Vorteile des Tunnelkostenmodells zur Geltung kommen.

Anwendungen durch den Ingenieur

Variantenstudium: Lageverschiebungen, Schacht- und Portalanordnungen, Ausbauprofile können in bezug auf Zeit- und Kostenkonsequenzen, sowie in bezug auf Empfindlichkeit auf geologische und marktwirtschaftliche Ungewissheiten untersucht werden. Die Schnelligkeit des Modells macht es möglich, eine Grosszahl von Varianten zu untersuchen und damit zur optimalen Lösung zu gelangen.

Voranschlag und Beurteilung der Offerten: Die im Variantenstudium ausgewählte Variante kann eingehender studiert

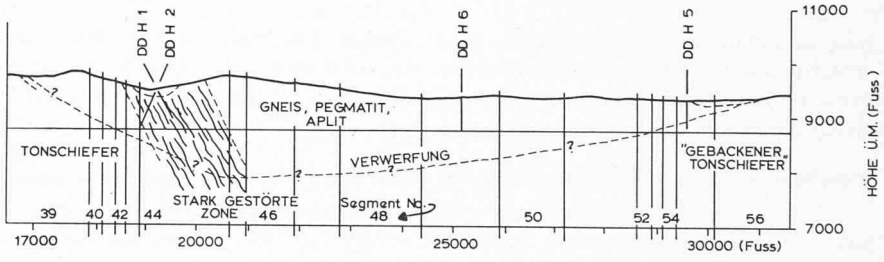


Bild 16. Roberts Tunnel. Segmentierung des Abschnitts der «Williams Range»-Verwerfung (nach Wahlstrom, 1944-5)

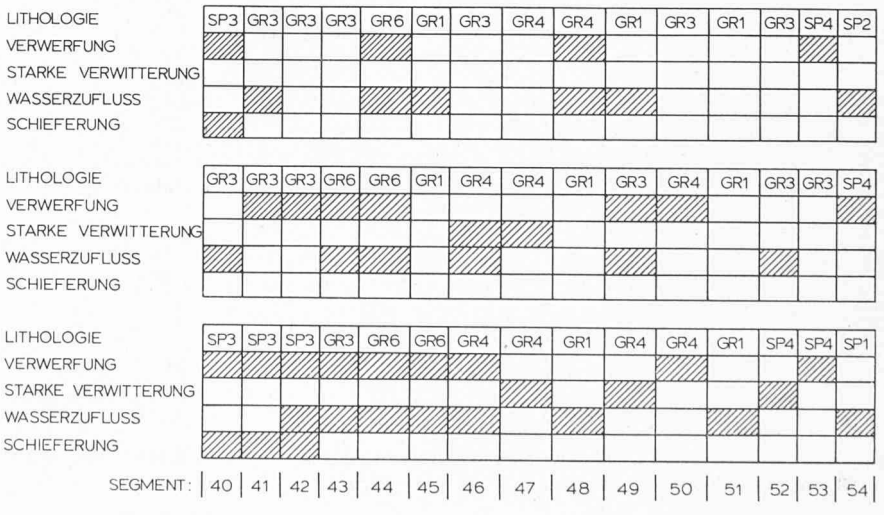


Bild 17. Roberts Tunnel. Simulierte geologische Längenprofile für den Abschnitt der «Williams Range»-Verwerfung. Gestrichelte Felder: ungünstige Verhältnisse, d. h. Verwerfung und Verwitterung vorhanden, Wasserzufluss hoch, starke Schieferung

HAROLD D. ROBERTS TUNNEL — STEEL SET VARIABLES

THE FOLLOWING VARIABLES WILL BE USED BY METHODS 4 5 6

SUPPORT STRATEGY = YES

VARIABLE NAME		NAME READ	PROB TYPE	VALUE OR RANGE OF VALUES			DIMENSIONS (UNITS)	APPLICABLE TO ROCK TYPE	END NODE
T_LAG_SS	*1	T LAG SS	4	3.00	7.00	15.00	MINUTES		
T_SET_INSTALL(1)	*2	T SET INST 1	4	12.00	25.00	85.00	MINUTES		
T_SET_INSTALL(2)		T SET I 2	0				MINUTES		
T_EXTRA_EXCAV		T EX EX	0				MINUTES		
T_EXTRA_MUCK		T EX MCK	0				MINUTES		
C_EXTRA_EXCAV		C EX EX			0.00		DOLLARS		
SET_SPACING		SET SPACE							
VALUE 1			1		5.00		FEET	GR	4 TO 8
VALUE 2			1		4.00		FEET	GR	9 TO 10
VALUE 3			1		5.00		FEET	GR	11 TO 12
VALUE 4			1		3.50		FEET	GR	13 TO 14
VALUE 5			1		3.00		FEET	GR	15 TO 16
VALUE 6			1		5.00		FEET	SC	5 TO 10
VALUE 7			1		3.50		FEET	SC	13 TO 14
VALUE 8			1		3.00		FEET	SC	15 TO 16
VALUE 9			1		4.00		FEET	SC	11 TO 12
VALUE 10			1		5.00		FEET	SC	21 TO 24
VALUE 11			1		4.00		FEET	SC	25 TO 26
VALUE 12			1		3.50		FEET	SC	29 TO 30
VALUE 13			1		3.00		FEET	SC	31 TO 32
VALUE 14			1		3.50		FEET	SC	27 TO 28
C_SET		C SET							
VALUE 1			1		200.00		DOLLARS	GR	1 TO 12
VALUE 2			1		240.00		DOLLARS	GR	13 TO 16
VALUE 3			1		200.00		DOLLARS	SC	1 TO 12
VALUE 4			1		200.00		DOLLARS	SC	13 TO 16
VALUE 5			1		200.00		DOLLARS	SC	17 TO 28
VALUE 6			1		240.00		DOLLARS	SC	29 TO 32

Abstand der Einbauboegen

Kosten der Einbauboegen

min wahrschein- lichste max

Zeit

Endknoten (Geologie), fuer welche die Werte der Variablen gelten

*1 Zeit fuer Verzugseinbau

*2 Zeit fuer Errichten eines Einbaubogens

Bild 18. Roberts Tunnel. Beispiele einer Parameterliste für vorläufigen Ausbau

und zu einem Voranschlag ausgearbeitet werden. Die vom eingebenden Unternehmer unterbreiteten Angaben sind mit den Annahmen des Ingenieurs auf detaillierter Basis zu vergleichen.

Anwendungen durch den Auftraggeber und durch den Planer

Variantenstudium: Bei Regional- oder Landesplanungen kann das Tunnelkostenmodell verwendet werden, um Baukosten und -zeiten für verschiedene Tunnellagen zu untersuchen. Es ist möglich, bei solchen Variantenstudien jede gewünschte Stufe der Detaillierung anzuwenden. Der Vergleich von Kosten- und Zeitstreuungen ist für ein solches Studium besonders wertvoll. Es ist nicht nur möglich, lagemässige Varianten sondern auch die Konsequenz zeitlicher Verschiebungen (Prioritäten, absichtlich verlangsamte oder beschleunigte Ausführung) zu untersuchen.

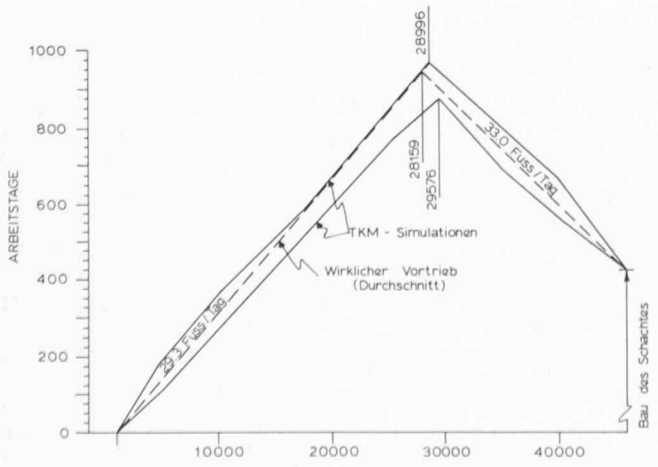


Bild 20. Roberts Tunnel. Vortriebs-Zeitdiagramm für den westlichen Teil. Distanz (Abszisse) in Fuss

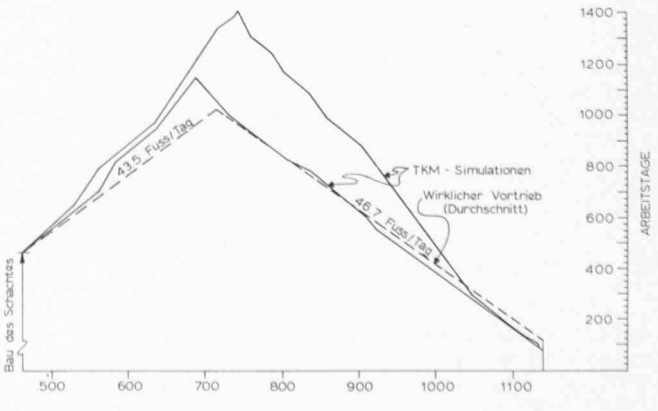
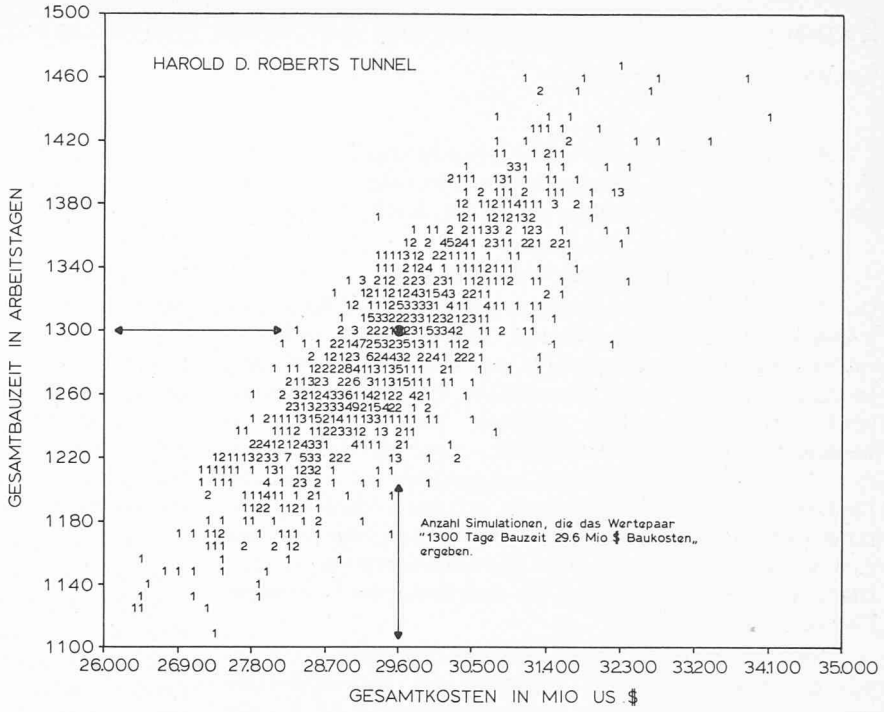


Bild 21. Roberts Tunnel. Vortriebs-Zeitdiagramm für den östlichen Teil

Bild 19. Roberts Tunnel. Streudiagramm für direkte Gesamtbaukosten und Gesamtbauzeit



Geologische Erkundigungen

Die Bedeutung geologischer Erkundungen konnte am Unterschied der Zeitschätzung für die beiden Tunnelabschnitte des Robertstunnels gezeigt werden. Eine der immer wieder auftretenden Fragen bei der Tunnelprojektierung und Bauvorbereitung betrifft die Notwendigkeit von zusätzlichen künstlichen Aufschlüssen (seismische Erkundungen, Bohrungen, Stollen). Die Kosten solcher Erkundungen müssen mit den durch die Erkundung ermöglichten Kosten- und Zeiteinsparungen verglichen werden. Das Tunnelkostenmodell kann für solche Vergleiche, die einzig auf probabilistischer Basis sinnvoll sind, verwendet werden. Die Grundlagen für eine solche Anwendung sind vorhanden (*Lindner,* 1975).

Neue Bauverfahren

Die Wirtschaftlichkeit neuer Bauverfahren, neuer Maschinen oder anderer Einrichtungen kann unter dem Aspekt des Tunnelkostenmodells betrachtet werden. Dabei kommt der Möglichkeit, Leistungsstreuungen und andere Ungewissheiten (Ausfälle) nachzubilden, besondere Bedeutung zu.

Nachtrag

Seit der Unterbreitung des Manuskripts ist das Tunnelkostenmodell von Unternehmern in *zwei Fällen* angewandt worden: an einem 8 km langen Wasserstollen von 3–4 m Durchmesser in *Colorado* und an einem Wasserstollensystem von 12 km Totallänge und 6 m Durchmesser in *New Hampshire*. Der Stollen in Colorado ist fertiggestellt, wobei die mit dem Modell vorausgesagten wahrscheinlichsten Bauzeiten und -kosten innerhalb von 2–3 Prozent der effektiven Werte lagen.

Zusammenfassung

Das Tunnelkostenmodell bestimmt die Baukosten und -zeiten von Tunneln in Fels, wobei es grundsätzlich dem üblichen Vorgehen – Interpretation der Geologie, Wahl von Baumethoden und Bauvorgängen, Abschätzen der Vortriebsleistungen – folgt. Im Gegensatz zu den üblichen Methoden kann aber die Ungewissheit der Geologie und die Streuung der Vortriebsleistungen nun in rationaler und detaillierter Weise in die Berechnungen einbezogen werden. Die resultierenden Kosten- und Zeitstreubereiche geben einen besseren Begriff über das Risiko; sie ermöglichen die Faktoren zu bestimmen, die am meisten zu den Streuungen beitragen, und sie ermöglichen, die Baumethoden zu bestimmen, die am empfindlichsten auf die Ungewissheiten reagieren. Die Schnelligkeit des Modells erlaubt das Studium einer grossen Zahl von Varianten, sei dies nun auf der Ebene des Planers, Ingenieurs oder Bauunternehmers. Es ist somit ein Verfahren, das die *Entscheidungsprozesse* der am Tunnelbau Beteiligten wesentlich unterstützen kann.

Literaturverzeichnis

Baecher G.B. (1972): «Site Exploration: A Probabilistic Approach.» Ph.D. Thesis MIT, 515 pp.

Deere D.U., Merrit A.H., Coon R.F. (1969): «Engineering Classification of In-Situ Rock.» Technical Report AFWL-TR-67-144.

Deere D.U. (1968): «Geological Considerations» in *Rock Mechanics in Engineering Practice*, Stagg & Zienkiewicz eds., pp. 1–20.

Einstein H.H., Vick S.G. (1974): «Geologic Model for a Tunnel Cost Model.» Proc. 2nd North American Rapid Excavation and Tunneling Conference, San Francisco, pp. 1701–1720.

General Research Corporation (1971): «Hard Rock Tunneling System Evaluation and Computer Simulation.» GRC-Report, CR-1-190.

Harza Engineering Company (1970): A Computer Program for Estimating Costs of Hard Rock Tunneling, prepared for U.S. Dept. of Transportation.

Lindner E.N. (1975): «Exploration: Its Evaluation in Hard Rock Tunneling.» MS Thesis MIT, 211 pp.

Moavanzadeh F., Markow M.J. (1974): «Simulation Model for Tunnel Construction Costs.» Preprint ASCE/EIC/RTAC Joint Transportation Engineering Meeting, Montreal, 58 pp.

Tunnel Cost Model (1974...), Series of MIT reports, Vols. 1...

Vick S.G. (1973): A Probabilistic Approach to Hard Rock Tunneling. MS Thesis MIT and Vol. 2 of Tunnel Cost Model Reports, 233 pp.

Wahlstrom E.E. (1974): «Harold D. Roberts Tunnel.» US Geological Survey Professional Paper No. 831-A.

Adresse der Verfasser: *H.H. Einstein,* Associate Professor of Civil Engineering Massachusetts Institute of Technology (MIT), Room 1-330 Cambridge (Mass.) 02139, USA, und *F. Moavenzadeh,* Professor of Civil Engineering, MIT.