

# Die Bedeutung der frühen Interaktion zwischen Spritzbeton und Gebirge

Dipl.-Ing. Dr. techn. Harald WAGNER  
Beton- und Monierbau Gesellschaft m.b.H., Innsbruck

## 1. EINLEITUNG

Mit der vor wenigen Jahren noch ungeahnten Ausbreitung der NÖT in bald sämtlichen tunnelbauenden Ländern der Erde wurde zwangsläufig auch eine immer größere Anzahl von projektbedingten, unterschiedlichen Randbedingungen und Problemen angetroffen, welche die Leistungsfähigkeit dieses Verfahrens auf die Probe stellen. Mit der Leistungsfähigkeit des Bauverfahrens wird jedoch nicht nur das Bauverfahren an sich, sondern auch die Fähigkeit der Ingenieure, welche an der Verwirklichung von Projekten, die nach dieser Methode gebaut werden, maßgeblich mitarbeiten, auf die Probe gestellt. Bei der Behandlung der frühen Interaktion zwischen Spritzbeton und Gebirge gilt es, die gesamte Breite der boden- und felsmechanischen Möglichkeiten zu erfassen und mit ihrem Counterpart, dem Spritzbeton, in Interaktion zu bringen.

Wissenschaft und Baupraxis untersuchen zur Zeit mit vereinten Kräften eine Vielzahl von neuen Spritzbetontechnologien. Große Hoffnung wird in die sogenannten Naßspritzverfahren gesetzt. Aber auch der Stahlfaserbeton beginnt langsam die seit Jahren in ihn gesetzten Hoffnungen zu erfüllen. Flüssige Beschleunigungsmittel werden vereinzelt mit Erfolg eingesetzt. Andere Überlegungen tendieren zu Hybridlösungen, bei denen vor dem Austritt des Spritzbetons aus der Spritzdüse

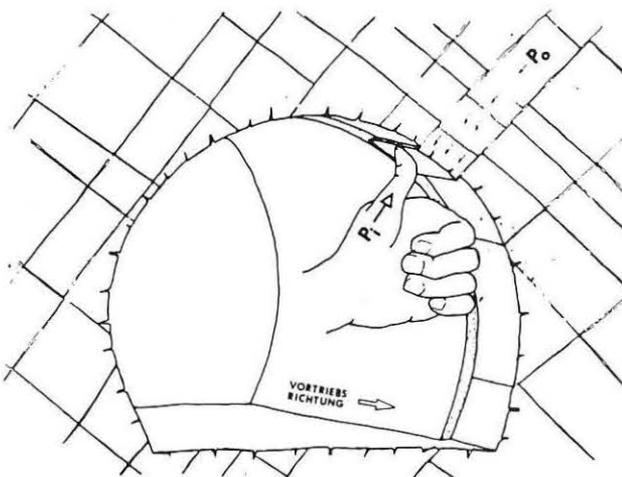


Abb.1. Interaktions-Schlüsselfunktion des Spritzbetons.

grundsätzliche Vorteile des Trockenspritzverfahrens mit solchen des Naßspritzverfahrens kombiniert werden.

Allen diesen Lösungsversuchen gemeinsam ist jedoch die Aufgabe, innerhalb einer vorgegebenen Festigkeit und Standzeit des Gebirges, welche durch die elastischen Eigenschaften beider Interaktionspartner charakterisiert werden, einen gemeinsamen Tragring mit elastischen Eigenschaften herzustellen. Unter Miteinbeziehung kontrollierter Verformungen soll zunächst Gleichgewicht und in weiterer Folge die erforderliche Tragsicherheit der Konstruktion erreicht werden.

Aufgabe der nachfolgenden Betrachtungen ist es daher, die Bedeutung der frühen Interaktion zwischen Spritzbeton und Gebirge an Hand einiger, allgemeingültiger Probleme aufzuzeigen und einige qualitative und analytische Lösungswege zu untersuchen.

## 2. PROBLEMSTELLUNG

Die nachfolgenden Bilder sollen in einzelnen Randbedingungen, wie sie beim Auffahren von untertägigen Hohlräumen sowohl im Locker- als auch im Festgestein angetroffen werden, illustrieren.

GEBIRGS-ARTEN	ERKENNUNGSMERKMALE		
LOCKER-GESTEINE	GROBKÖRNI G E B Ö D E N	KIESE	-
	GEMISCHKÖRNI G E B Ö D E N	SANDE	-
FEST-GESTEINE	FEINKÖRNI G E B Ö D E N	SCHLUFFE / TONE (UNTERSCHIEDLICHER KORNABSTUFUNGEN)	LEICHT BIS AUSGE- PRAGT PLASTISCHE EIGENSCHAFTEN
	MIT UND OHNE GRUNDWASSEREINFLUSS		
	MAGMATISCHE GESTEINE	UNVERWITTERT	SEHR STARK KLÜFTIG
FEST-GESTEINE	METAMORPHE GESTEINE	ANGEWITTERT	STARK KLÜFTIG
	SEDIMENT GESTEINE	ENTFESTIGT	KLÜFTIG
	MIT UND OHNE BERGWASSEREINFLUSS	ZERSETZT	SCHWACH KLÜFTIG KOMPAKT

Abb.2. Grobbeschreibung von Locker- und Festgesteinen.

## 2.1 Lockergesteine

Kohäsionslose Sande in lockerer bis dichter Lagerung werden vornehmlich im U-Bahn-Bau, jedoch auch teilweise beim Auffahren von Überlagerungsbereichen im alpinen Felstunnelbau angetroffen. Ihre Eigenfeuchte verleiht solchen Sanden eine vorübergehende scheinbare Kohäsion und damit eine vorübergehende kurzzeitige Standfestigkeit, welche zu kurzfristigem und sehr schnell wirksamem Einbringen des Ausbauwiderstandes genützt werden muß.

In den kohäsiven Lockergesteinsböden sind Tone und Schluffe seltener in homogener Erscheinungsform, häufiger in Mischformen mit eingelagerten Sandlinsen aufzufahren. Ihre Konsistenz differiert von weichplastischen

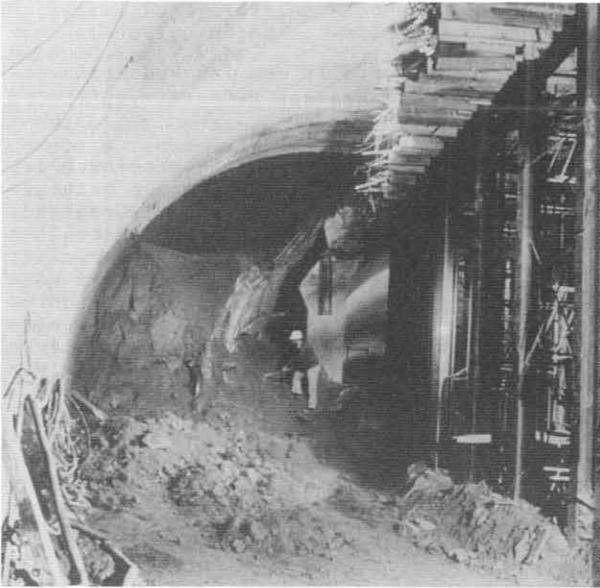


Abb.3. U-Bahn Bochum: Restausbruch in Grünsandmergeln.



Abb.4. Metro Mexico: Vortrieb in mergeligen Schluffsanden.



Abb.5. Ganzsteintunnel/Steiermark: Vortrieb in plastischen Myloniten.

bis steifplastischen Böden und in weiterer Folge bis zu gesteinsharten Formen. Ihre Standzeit geht im allgemeinen über jene der kohäsionslosen Böden hinaus. Ihr geomechanisches Verhalten wird häufig durch Langzeitverformungen charakterisiert. Um ihr Verformungsverhalten jedoch ausreichend sicher kontrollieren zu können, und um einerseits die Genauigkeit des geforderten Profils und andererseits die durch den Hohlraumbau hervorgerufene Beeinflussung der Umgebung zu beherrschen, hat sich der rasche Ringschluß als das zum Stand der Technik gehörende Instrument bewährt. Projekte, welche unter diese geomechanische Kategorie fallen, wurden in der Vergangenheit sowohl im innerstädtischen Verkehrstunnelbau als auch im alpinen Tunnelbau aufgefahren.

## 2.2 Festgesteine

Bei den Hohlräumen, welche im Festgestein aufzufahren sind, ist das Augenmerk zunächst auf jene Projekte zu lenken, welche durch eine gewisse Schichtung und Klüftung charakterisiert sind. Es ist naheliegend und einleuchtend, daß bei der Herstellung von Hohlräumen in geschichtetem und geklüftetem Gebirge Klüftkörperverbände eine Störung erfahren. Naturgemäß ist die eingetragene Störung abhängig von der eingesetzten Ausbruch- und Sicherungsmethode, aber auch vom Faktor Zeit. Ob "smooth blasting", Teilschnittmaschine oder Tunnelbagger, immer werden die elastoplastischen Eigenschaften in der Umgebung des Hohlraumes verändert. Insbesondere gilt der Grundsatz, daß die Festigkeit des Gebirges durch die Wahl entsprechender Stützmittel des Ausbaus zu erhalten ist.

Zwischen durch Klüftkörperverbände charakterisierten Gebirgsformationen und solchen, welche massiv und ungeklüftet sind, gibt es naturgemäß eine Vielzahl von Übergangsformen. Je weiter sich die gebirgsmechanische Charakteristik zum massiven Gebirge hin bewegt, desto geringer wird der Stützmittelaufwand. Umfangreiche Erfahrungen von ausgeführten



Abb. 6. Tunnel Altengronauer Forst/BRD: Kalottensicherung im geschichteten Sandstein.



Abb. 7. Bochum Tunnel Westtangente: Ulmensicherung im geschieferten Karbon.

Projekten, aber auch theoretische Untersuchungen, welche unter Zugrundelegung verschiedenster Modellvorstellungen durchgeführt wurden, zeigen, daß jedoch in den meisten Fällen Spritzbetonschalen, wenn auch in Ausführung von nur wenigen Zentimetern, vorteilhaft eingesetzt werden. Es gilt also auch in solchen Fällen, durch eine Versiegelung des Gebirges an der Oberfläche des Hohlraumes eine gewisse Stützwirkung auf die gegen den Hohlraum zufließenden Kräfte auszuüben, mit der Absicht, die unnützlich den Ausbau belastenden Auflockerungen des Gebirges zu vermeiden und damit die Eigentragfähigkeit als wesentliche hohlraumstützende Komponente zu erhalten.

### 3. KENNLINIEN-DIAGRAMM

Von allgemeiner Bekanntheit ist die Tatsache, daß sich nach dem Ausbruch die elastischen Eigenschaften des den Hohlraum umgebenden Gebirges verändern. So verringern sich also die Festigkeitseigenschaften, es kommt zur Bildung von plastischen Zonen infolge der Spannungsumlagerungen. Solche Spannungsumlagerungen, welche immer mit Verformungen einhergehen, werden unter der Voraussetzung einer hinlänglich genauen Kontrolle dieser Verformungen vom Tunnelbauer durchaus gewünscht, denn sie bewirken die Ausbildung des Tragringes in dem den Hohlraum umgebenden Gebirge.

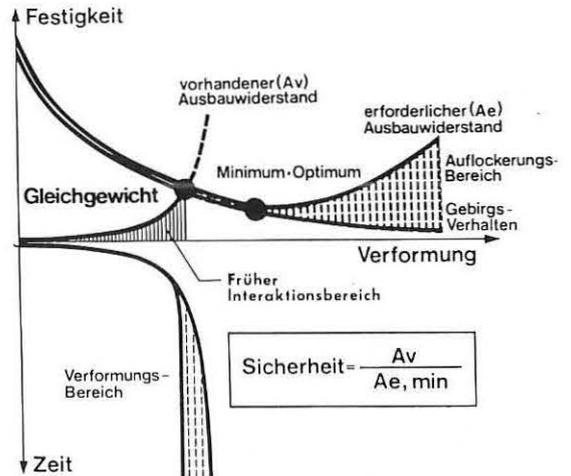


Abb. 8. Vereinfachte Darstellung der Fenner/Pacher-Kurve.

Dieser Tragring stellt nach der Auffassung der Neuen Österreichischen Tunnelbauweise das wesentlichste Konstruktionselement des den Hohlraum stützenden Tragsystems dar. In vereinfachter Form hat der Ausbau die Aufgabe, die Bildung dieses Tragringes zu ermöglichen. Die innerhalb des Tragringes den Hohlraum angreifenden Lasten werden durch den Hohlraum stützenden Ausbau ins Gleichgewicht gebracht. Tragreserven im Ausbau tragen zur Erhöhung der Sicherheit bei.

### 4. STÜTZWIRKUNG VON SPRITZBETON

Im Rahmen der einzelnen Stützmittelelemente, welche in Abhängigkeit von den jeweils aufgeführten geomechanischen Randbedingungen eingesetzt werden, kommt dem Spritzbeton, und hier insbesondere dem jungen Spritzbeton, eine ganz besondere Bedeutung zu.

Während es im seicht liegenden Tunnelbau und dabei insbesondere unter Lockergesteinsverhältnissen darauf ankommt, eine Stützung des ausgebrochenen Hohlraumes durch frühzeitigen Einbau, meist eines geschlossenen Spritzbetonringes zu erreichen, um Verformungen klein zu halten, kommt es beim tiefliegenden Tunnelbau unter meist geschichteten und geklüfteten Gebirgsverhältnissen darauf an, tiefergreifende Auflockerungen und damit unnötige Belastungen des Ausbaus zu verhindern. Dies kann durch Steuerung der Verformungen über die kontrollierte Einbringung von Spritzbeton mit definierten Frühfestigkeitseigenschaften erreicht werden.

## 5. INTERAKTIONSMCHANISMEN SPRITZBETON/GEIRGE

Nach H.H. Einstein beinhaltet die Interaktion Spritzbeton und Gebirge mehrere Mechanismen, welche sich von üblichen Stahlbeton-Interaktionen unterscheiden.

INTERAKTIONSMCHANISMEN (NACH H.H. EINSTEIN 1976)	WIRKUNG SPRITZBETON / GEBIRGE
1 MECHANISMUS	HAFTWIRKUNG AM GEBIRGE - SCHER- UND DRUCKBEANSPRUCHUNG IN SPRITZBETON UND GEBIRGE
2 MECHANISMUS	VERSCHLUSSWIRKUNG VON SPALTEN- ÜBERTRAGUNG VON DRUCK-SCHER-UND ZUGBEANSPRUCHUNG IM GEBIRGE
3 MECHANISMUS	VERBUNDWIRKUNG SPRITZBETON - GEBIRGE INFOLGE HAFT-UND VERSCHLUSSWIRKUNG SOWIE INFOLGE AUSBRUCHSUNEBCHEITEN
4 MECHANISMUS	SCHERWIRKUNG DURCH PARTIALVERFORMUNG- ÜBLICHE STATISCHE STAHLBETONBEANSPRUCHUNG
5 MECHANISMUS	DRUCK-UND SCHERWIRKUNG - DOMINANZ ÜBER BIEGEBEANSPRUCHUNG IM SPRITZBETON

Abb.9. Interaktionsmechanismen nach  
H.H. Einstein 1976.

- Der Spritzbeton haftet am Untergrund infolge einer Kombination von Scher- und Druckbeanspruchung zwischen Gebirge und Spritzbeton einerseits und andererseits auch innerhalb des Spritzbetons.
- Der Spritzbeton füllt Öffnungen und Klüfte im Gebirge, an der Hohlräumoberfläche und in seiner Umgebung. Das gestattet die Übertragung von Druck-, Scher- und Zugbeanspruchungen in diesem Bereich.
- Die beiden Charakteristiken - nämlich Haftung am Gebirge und die Füllung von Öffnungen - führen zu einer innigen Interaktion von Gebirge und Spritzbetonschale. Aufgrund der Haftung und der Verbindung von Klüften ist es möglich, Scherbeanspruchungen ohne oder mit nur geringem Verlust zwischen Spritzbeton und Gebirge, aber auch Zugspannungen zu übertragen. Der Spritzbeton und das umgebende Gebirge verhalten sich daher bis zu einem gewissen Ausmaß wie ein kombiniertes Tragsystem.
- Mitunter kann es vorkommen, daß Teile des Gebirges (entweder einzelne Klüftkörper oder plastifizierende Gebirgsbereiche) sich verformen und dabei die Spritzbetonschale durchscheren. Dieser Schermechanismus entspricht dem Verhalten von üblichen Betontragwerken, ist jedoch insbesondere wegen seiner Bedeutung beim Entwurf von Tunnelschalen zu erwähnen.

e) Eine der wichtigsten Spritzbetoneigenschaften ist die Flexibilität von dünnen Spritzbetonschalen bei ihrer Anwendung im Tunnelbau. Die Flexibilität beruht nicht ausschließlich auf der Verwendung von dünnen Schalen, sondern auch auf der Tatsache, daß der Spritzbeton statisch unmittelbar nach dem Auftragen wirkt. Mit anderen Worten, es wird das viskose Verhalten von grünem Spritzbeton unter Last mit Absicht eingesetzt. Diese Grundmechanismen (Biegung, Druck und Scherung) verändern sich nicht, aber wegen der Flexibilität wird die Biegung im Vergleich mit Druck und Scherung relativ unwichtig.

f) Der Einfluß der vorstehenden Ecken und Kanten wird immer wieder diskutiert. Die üblicherweise unebene Ausbruchsfläche, besonders in gesprengt ausgebrochenen Tunnels, führt zu einer verhältnismäßig unebenen Spritzbetonschale. Dies vergrößert das Trägheitsmoment der Spritzbetonschale, wenn es unabhängig vom Gebirge betrachtet wird. Es vergrößert den vorher erwähnten Verbindungseffekt. Des weiteren vergrößert sich bereichsweise die effektive Dicke des Spritzbetons wegen der geneigten Oberfläche.

## 6. ELASTISCHE EIGENSCHAFTEN DES SPRITZBETONS

Es gibt mehrere bekannte analytische Verfahren, denen Aussagen über den erforderlichen Ausbauwiderstand unter vorgegebenen Randbedingungen, wie geomechanischen Eigenschaften des Gebirges, Ausbruchdurchmesser, Überlagerungshöhe usw., zu entnehmen sind. Dem errechneten Ausbauwiderstand liegt eine eindeutige Annahme über die erforderliche Qualität des Spritzbetons im Endstadium zugrunde.

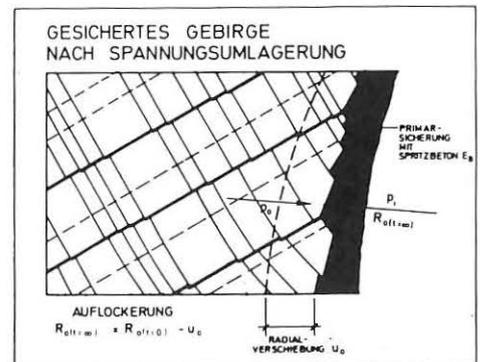
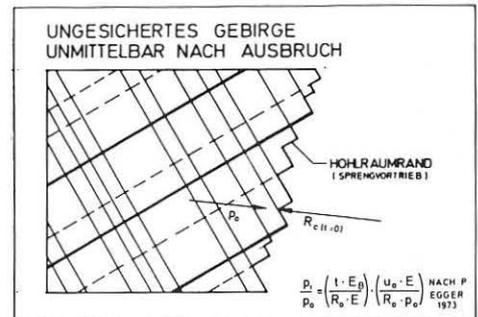


Abb. 10a. Ungesichertes Gebirge unmittelbar  
nach dem Ausbruch.

Abb. 10b. Gesichertes Gebirge nach Spannungsumlagerung.

Geonumerische Berechnungsverfahren, gegebenenfalls unter Einsatz von Finiten Elementen, würden eine stärkere Differenzierung der Festigkeitseigenschaften des Spritzbetons gestatten. Üblicherweise werden jedoch auch bei Einsatz dieser Verfahren nicht mehr als 2 - 3 unterschiedliche Werte, z.B. für den E-Modul des Spritzbetons, untersucht.

Die Zeitabhängigkeit der Festigkeitsentwicklung, vor allem des jungen Spritzbetons, aber auch die Anforderungen der Festigkeitsentwicklung von jungem Spritzbeton in Abhängigkeit von verschiedenen Gebirgsfestigkeitsklassen, bleiben im allgemeinen unberücksichtigt.

7. SCHERFESTIGKEITSEIGENSCHAFTEN DES GEBIRGES

Zweifelloos wird durch rechtzeitiges Auftragen des Spritzbetons auf die Gebirgsoberfläche ein bisher noch nicht genügend genau erfaßbarer Verbesserungseffekt, insbesondere der Scherfestigkeitseigenschaften, erreicht.

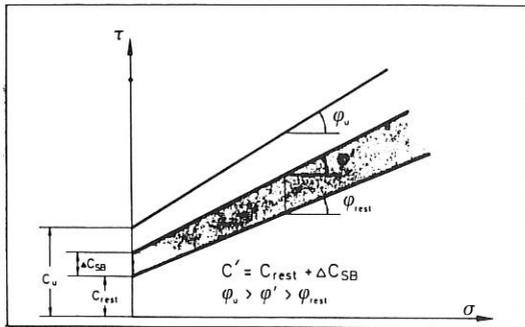


Abb. 11. Relative Verbesserung der Scherfestigkeit des Gebirges durch frühwirksamen Spritzbeton.

Einerseits bewirkt der frühwirksame Spritzbeton sowohl durch seine Stützwirkung als auch durch seine Verbindungswirkung im Falle von offenen Klüften durch kontrollierte Verformung auf dem Umweg über die Spannungumlagerung die Herstellung eines neuen Gleichgewichtszustandes. Andererseits kommt es zu einer relativen Verbesserung gegenüber den Restscherspannungen, welche sich dann einstellen würden, wenn keine Stützung erfolgen würde. Die relative Zunahme der Scherfestigkeit ist abhängig

- a) von der Festigkeit des Gesteins,
- b) von der Verformung im Bereich potentieller Gleitflächen,
- c) vom Zeitpunkt des Einbaus und
- d) von der gewählten freien Stützweite (Abschlagslänge).

Naturgemäß sind auch Einflüsse von anderen Stützmitteln, z.B. Ankern, Stahlbögen oder Baustahlmatten, zu berücksichtigen.

8. SPRITZBETONFESTIGKEITSPARAMETER - TUNNELSTATISCHE BERECHNUNGEN

Detaillierte Untersuchungen über den Einfluß von Spritzbeton unterschiedlicher Festigkeiten und unterschiedlicher Steifigkeiten zu bestimmten Zeiten sind in der Literatur wenig bekannt.

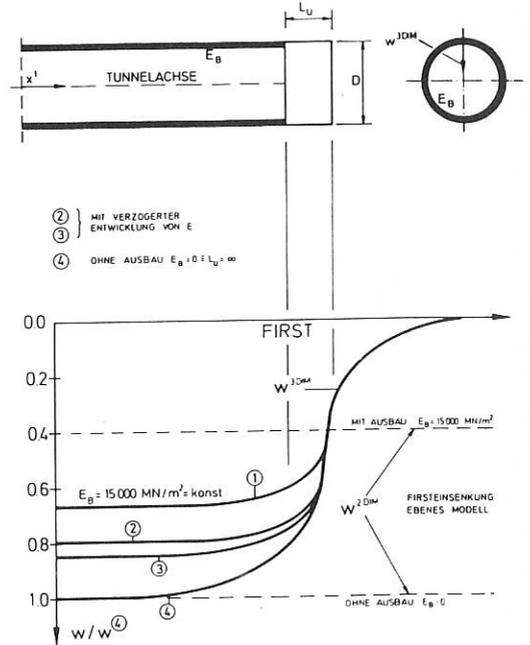


Abb.12. Entwicklung der Firstverschiebungen für verschiedene Spritzbetonfestigkeiten (nach J. Erdmann 1983).

Rechnerische Ansätze über den Einfluß unterschiedlicher Steifigkeiten wurden von John/Pöttler (Karlsruhe 1983) vorgestellt.

Duddeck et al. haben im Zuge von Standsicherheitsuntersuchungen für die Tunnel der Neubaustrecke der Deutschen Bundesbahn bei der Entwicklung von Berechnungsmodellen nach den TVR Überlegungen bezüglich der E-Modul-Entwicklungen angestellt, welche sich im einzelnen auf die Dissertation von J.Erdmann beziehen.

Im konkreten wurde eine Untersuchung über die Entwicklung der Firstverschiebungen im Bereich der Ortsbrust angestellt, wobei die Unterschiede in der zeitabhängigen Entwicklung der Spritzbetonfestigkeit über ca. 4 - 5 D entsprechende Länge des Tunnels aufgezeigt werden. Dabei ist ein größerer Teil der Firstverschiebung vor dem Einbringen des Betons aufgetreten, wobei eine entsprechend un-

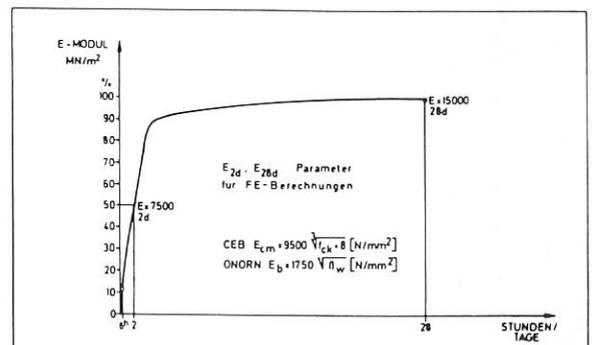


Abb.13. Zeitabhängigkeit des Elastizitätsmoduls von Spritzbeton (typisches Beispiel).

gehinderte Entspannung des Gebirges angenommen wurde. Die Kurven basieren auf zwei- und dreidimensionalen FE-Berechnungen mit näherungsweise elastischem Stoffverhalten. Es zeigt sich, daß bei einem Einsatz von Spritzbeton mit verstärkter Entwicklung von  $E_B$  größere Verformungen als bei konstantem  $E_D$ , jedoch naturgemäß kleinere Verformungen als bei unverbauten Hohlräumen auftreten. Eine Differenzierung nach verschiedenen Gebirgsgüteklassen, Stützweiten und Stehzeiten des Gebirges wurde jedoch auch in diesem Fall nicht vorgenommen.

9. GEBIRGSFESTIGKEIT - TUNNELLAGE - SPRITZBETONFRÜHFESTIGKEIT

Im Hinblick auf Gebirgsfestigkeitsklassen und Tunnellage gibt es Zusammenhänge, welche qualitativ von Seeber et al. in Heft 133,

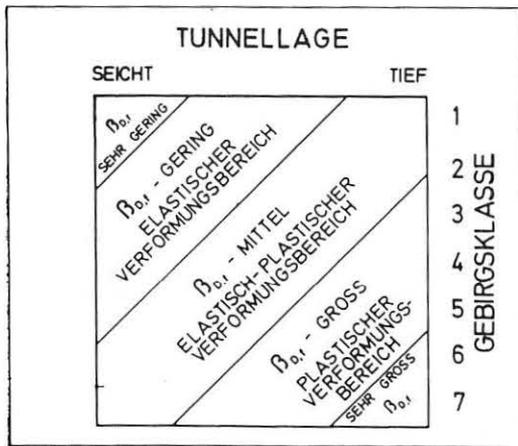


Abb.14. Qualitativer Zusammenhang zwischen Gebirgsfestigkeitsklasse, Tunnellage und Spritzbeton-Frühfestigkeitsentwicklung.

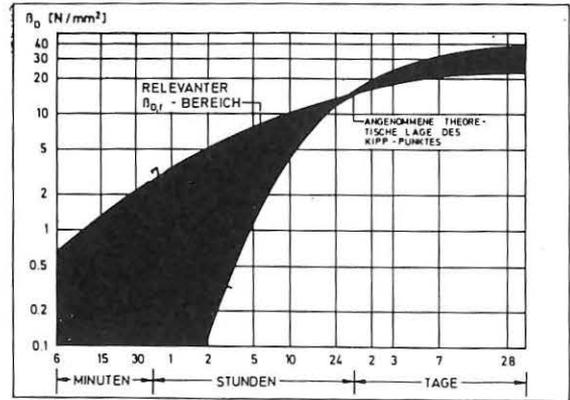


Abb.15. Vorschlag für Anforderungen an die Festigkeitsentwicklung von Spritzbeton für verschiedene Gebirgsfestigkeitsklassen.

Bemessungsverfahren, etc. der Österreichischen Straßenforschungsgesellschaft dargestellt wurden.

Demzufolge sind niedrigen Überlagerungen und guten Gebirgsfestigkeitsklassen kleine Deformationen im elastischen Bereich zuzuordnen, während hohen Überlagerungen und schlechten Gebirgsfestigkeitsklassen größere Deformationen im plastischen Bereich zuzuordnen sind. Sinngemäß kann diese Aussage auch auf die Spritzbetonfrühfestigkeitsentwicklung ( $\beta_{D,t}$ -Entwicklung) übertragen werden. Demzufolge sind seicht liegenden Tunnels in guten Gebirgsfestigkeitsklassen geringere Frühfestigkeitswerte zuzuordnen, während tiefliegenden Tunnels in schlechten Gebirgsgüteklassen wesentlich größere  $\beta_{D,t}$ -Werte zuzuordnen sind.

Gebirgsfestigkeitsklassen		1	2	3	4	5	6	7
B 2203		Standfest	Nachbrüchig	Leicht gebräch	Gebräch	Sehr gebräch	Stark druckhaft	Fließend
SIA 199				Sehr gebräch				
Mittlere Stehzeit T (Std.)	Stützweite $L > b$	$< 8$	$10^4$	$10^2$	$10^0$	$10^{-2}$	$10^{-4}$	0
	Stützweite $L < b/4$	$< 8$	$> 10^4$	$> 10^3$	$> 10^0$	$5 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-4}$	0
Erforderliche Spritzbetonsicherung		Keine	Firstschutz	First- und Ulmen-sicherung	Rasche First- und Ulmen-Sicherung	Sofort-sicherung ggfs. mit Schlitzen	Auflösung in Teilquerschnitte mit Sofort-sicherung	Teilquerschnitte mit Sofort-sicherung und Brustverzug
Erforderliche Spritzbetonfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ] $\beta_{D,0.5h}$		$< 0.1$	$> 0.2$	$> 0.5$	$\sim 1.0$	$> 1.5$	$> 2.0$	$> 3.0$

Abb.16. Vorschlag für Gebirgsfestigkeitsklassen/ Mittlere Stehzeit/ Spritzbetonsicherung/ Spritzbetonfrühfestigkeit.

Ebenso wird unter derselben Literatur ein Zusammenhang zwischen Gebirgsverhalten, Stehzeit, Verformung und erforderlichen Sicherungsmaßnahmen festgestellt, und der Versuch unternommen, diesen Zusammenhang auf erforderliche Spritzbetonfestigkeiten des grünen Spritzbetons zu erweitern. Es zeigt sich dabei, daß für ein als standfest charakterisiertes Gebirge mit einem  $\beta_{D,f}$ -Wert  $\leq 0,1$  das Auslangen gefunden werden würde, während unter fließendem bzw. sehr druckhaften Gebirgsverhältnissen ein  $\beta_{D,f} \geq 3,0 \text{ N/mm}^2$  erforderlich wäre.

#### 10. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die vorstehenden Überlegungen beziehen sich auf Beobachtungen, welche unter unterschiedlichsten geomechanischen Randbedingungen beim Bau von Tunnels und Stollen in der Planung und Ausführung gewonnen wurden. Bei den angegebenen Werten handelt es sich um Abschätzungen bzw. um qualitative Aussagen, deren Bestätigung durch fundierte und umfangreiche Versuche differenziert für flach- und tief- liegende Tunnels noch erbracht werden muß.

Die Voraussetzungen für die baupraktische Kontrolle der frühen Festigkeitsentwicklung des Spritzbetons wurden durch die Entwicklung von diesbzüglichen Meßgeräten am Institut für Baustofflehre der Universität Innsbruck geschaffen. Bei der Durchführung weiterer tech-

nologisch erforderlicher Untersuchungen kommt es darauf an, daß Wissenschaft und Industrie, also Theorie und Praxis, eng zusammenarbeiten. In diesem Sinne sei hierzu eine Anregung ausgesprochen.

#### LITERATUR

1. Duddeck, H., et al.: Standsicherheitsuntersuchungen. Felsbau Nr. 3 (1984).
2. Einstein, H.H.: European Shotcrete Design and Practice. State of the Art Review on Shotcrete, Contract Report S-76-4, USA-Army Engineer Waterways Experiment Station (1976).
3. Erdmann, J.: Berechnungsverfahren. Bericht Nr. 83/40 Technische Universität Braunschweig (1983).
4. John, M., und Pöttler, H.: Vortrag Technische Universität Karlsruhe (1983).
5. Seeber, G., et al.: Bemessungsverfahren. Straßenforschung, Heft 133, Wien (1980).
6. Wagner, H.: Bergmännisch hergestellte Tunnelkonstruktionen - Vergleichende Aspekte beim Bau seicht- und tiefliegender Untertagebauwerke. Vortrag Montan-Universität Leoben (1983).