

Junger Spritzbeton im Tunnelbau: Beanspruchung - Auslastung - Verformung

GREEN SHOTCRETE IN TUNNELLING: STRESSES - STRENGTH - DEFORMATION

Dipl.-Ing. Dr. techn. Rudolf Pöttler, Ingenieurbüro Lässer-Feizlmayr, Innsbruck

Üblicherweise werden die Anforderungen an den jungen Spritzbeton, aufbauend auf jahrelanger Erfahrung, ohne Berücksichtigung von Gebirgs- und Vortriebsparameter definiert. Unzählige Tunnelkilometer wurden mit Spritzbeton entsprechend solcher Spezifikationen erfolgreich aufgeföhren. Verbrüche aufgrund von zu niedriger Festigkeit oder Verformbarkeit des Spritzbetons waren selten. So gesehen ist diese von der Erfahrung geprägte Vorgehensweise sehr erfolgreich.

Aufgrund neuester Forschungen und leistungsfähiger Computer können heute Aussagen über die tatsächliche Beanspruchung des Spritzbetongewölbes im Ortsbrustbereich getroffen werden. Umfangreiche numerische Untersuchungen, die das nichtlineare und zeitabhängige Verhalten von Spritzbeton und Gebirge im Ortsbrustbereich erfassen, wurden durchgeführt. Die ermittelten Beanspruchungsparameter wurden in Diagrammen aufgetragen und den jeweiligen Grenzwerten gegenübergestellt. Auf diese Weise ist es möglich, den im Spritzbeton vorhandenen Teilsicherheitsbeiwert, Beanspruchungsgrad und die Verformungsreserven zu definieren. Bis zu einem gewissen Grad bestätigen diese Ergebnisse die jetzige konservative Vorgehensweise bei der Spezifikation des jungen Spritzbetons, sie zeigen jedoch auch ihre Grenzen und Gefahren auf.

Usually, the requirements for green shotcrete are defined on the basis of long-standing experience disregarding rock parameters, advance rates and geometry. An infinite number of tunnel kilometres have been successfully excavated and lined with shotcrete according to such specifications. Failure due to insufficient strength of shotcrete has occurred only rarely - a fact substantiating the efficiency of this method based on practical experience.

Today, however, the actual loading of the shotcrete near the working face can be determined accurately by means of state-of-the-art research techniques and high-capacity computers. Extensive numerical investigations modelling the non-linear and time-dependent behaviour of shotcrete and rock mass in the proximity of the working face have been performed. The computed stress parameters are plotted in diagrams and compared with the relevant limiting values by which procedure the partial safety coefficient of the shotcrete is defined. On the one hand, the results confirm the conservative method of specifying green shotcrete presently practised, on the other hand, they reveal its restrictions and hazards.

1. Einleitung

Seit nunmehr 1 Jahr liegt die neue Richtlinie Spritzbeton /1/ vor. Damit wurde ein dringendes Anliegen der Baupraxis realisiert, einheitliche Regeln für Planung, Ausschreibung, Herstellung und Prüfung von Spritzbeton zur Hand zu haben. Bereits in der Ausschreibungsphase eines Projektes sollten auf dieser Grundlage die wichtigsten Eigen-

schaften des Spritzbetons definiert werden. Die maßgebenden Eigenschaften des Spritzbetons ergeben sich aus den konstruktiven und statischen Erfordernissen. Insbesondere die Festigkeitsanforderungen an den jungen Spritzbeton, darunter ist Spritzbeton bis 24 Stunden Alter zu verstehen, haben im Hinblick auf die Stabilität des Tunnels und die erreichbare Endfestigkeit große Bedeutung /2, 3, 4/. Die Beanspruchung des

Spritzbetons im Tunnelbau wird durch das Gebirgsverhalten geprägt. Die Auswirkungen des Gebirgsverhaltens auf das tatsächliche Anforderungsprofil des jungen Spritzbetons verglichen mit dem in /1/ festgeschriebenen sollen Gegenstand der nachfolgenden Abhandlung sein.

Die Betrachtungen werden auf Normalspannungen im Spritzbeton beschränkt. Nicht eingegangen wird auf eine Beanspruchung der Spritzbetonschale durch Abscheren.

2. Geschichtlicher Rückblick

Diese historische Rückblende erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sondern zeigt die markantesten Stationen der Entwicklung der Ermittlung der Spritzbetonbeanspruchung im Tunnelbau auf.

Spritzbeton ist in Österreich seit nunmehr annähernd 40 Jahren im Tunnelbau als eines der wesentlichsten Elemente der Neuen Österreichischen Tunnelbauweise /21/ im Einsatz. Maßgebend wurde in der ersten Hälfte der 50er Jahre Spritzbeton beim Bau des Kraftwerkes Prutz-Imst /17/ und in der zweiten Hälfte beim Bau des Kraftwerkes Schwarzach /18/ als Sicherungselement eingesetzt.

Über die günstige Tragwirkung des Spritzbetons war man sich bereits damals im klaren, exakte oder schlüssige Erklärungen gab es jedoch noch nicht. So schrieb z.B. Detzelhofer 1960 /17/ über die frühe Stützwirkung des Spritzbetons:

"Eine solche Funktion scheint der Spritzbeton zu erfüllen, indem er den Zusammenhang des anfangs noch tragenden Felsgewölbes gewissermaßen konserviert. Vermutlich ist es in erster Linie die Zug- und Scherfestigkeit des Spritzbetons, welche die Auflösung der Lockerungszone von Anfang an verhindert ..." oder Kastner 1959 /18/:

"Auf die überraschende Standfestigkeit von Spritzbetonaukleidungen, selbst bei geringer Dicke des Auftrages, wurde wiederholt hingewiesen."

Von Praktikern wurde festgestellt, daß die in den Druckdosen gemessenen Werte der Spritzbetonbeanspruchung annähernd von Verformung und Überlagerung unabhängig sind. Dies deutete auf ein nachgiebiges, plastisches Verhalten des jungen Spritzbetons hin, wie es für die Anwendung der NÖT erstrebenswert ist /21/.

Erste numerische Untersuchungen von Spritzbetonaukleidungen wurden u.a. von Sattler 1965 /19/ für den Schwaikheimtunnel unter An-

wendung eines elastisch gebetteten Stabzugmodells durchgeführt. 1971 mit dem Erscheinen des 1. Buches von Zienkiewicz /20/ wurde das Startsignal für die breite Anwendung der Finiten Element Methode in der Felsmechanik gegeben. Die Berechnungen in den Jahren 1965 bis 1985 hatten jedoch den gravierenden Nachteil, daß die ermittelten Spritzbetonbeanspruchungen unrealistisch hoch waren. Es wurde mit der Zeit immer deutlicher, daß das Verhalten des jungen Spritzbetons nicht richtig abgeschätzt wurde. Insbesondere für das Kriechen des früh belasteten Spritzbetons gab es keine Anhaltswerte. Es fehlte offenbar an der Grundlagenforschung /22/.

Einen Durchbruch bei der Erfassung des Verhaltens von jungen Spritzbeton bildeten die Laborversuche von Rokahr und Lux 1985/86 /6/. Damit wurde das große Relaxationsvermögen des früh belasteten jungen Spritzbetons nachgewiesen und in eine für Berechnungen anwendbare Form gebracht. Damit ließen sich viele aus der Praxis bekannte Phänomene nachvollziehen und erklären. Die rechnerisch ermittelten Spritzbetonspannungen waren nicht mehr in utopischen Höhen sondern wurden durch die Relaxationsphase des Spritzbetons zwischen den Abschlüssen in realistischen Grenzen gehalten. In situ Messungen konnten die Laboruntersuchungen bestätigen /11, 16/.

3. Spritzbetonbeanspruchung

Ein Maß für die Spritzbetonbeanspruchung stellt der globale Auslastungsgrad α dar /5/.

$\text{Auslastungsgrad} = \frac{\text{Beanspruchungsgrad}}{\text{Festigkeit}}$ $\alpha = \frac{\sigma}{\beta} \quad (1)$
--

Dieser auf einer Spannungsbasis definierte Auslastungsgrad beinhaltet implizit aufgrund seiner Zeitabhängigkeit und der Spannungs-Dehnungsbeziehung des Werkstoffes Spritzbeton auch die Verformungsgrößen Verzerrung und Verzerrungsgeschwindigkeit.

In Bild 1 ist der Zusammenhang zwischen Spritzbetoneigenschaften - Randbedingungen - Spritzbetonbeanspruchung - Auslastungsgrad übersichtlich dargestellt. Von den Spritzbetoneigenschaften sind für die Beanspruchung des Spritzbetons die folgenden angeführten Parameter wesentlich:

Steifigkeitsentwicklung
 Relaxations- und Kriechverhalten
 Temperaturentwicklung

Kluftparameter
 Anisotropien
 Primärspannungszustand
 Gebirgscharakteristik
 Vorentspannung

Diese Parameter weisen alle eine ausgeprägte Zeitabhängigkeit auf.

Unter Randbedingungen werden die Gebirgs-, Vortriebs- und Geometrieparameter verstanden. Hier sind anzuführen:

Gebirgsparameter
 Steifigkeitsparameter
 Festigkeitsparameter
 Zeitparameter

Vortriebsparameter
 Abschlagslänge
 Vortriebsgeschwindigkeit
 freie Stützweite
 Geometrieparameter
 Ausbruchsform
 Ausbruchsgröße
 Spritzbetonstärke

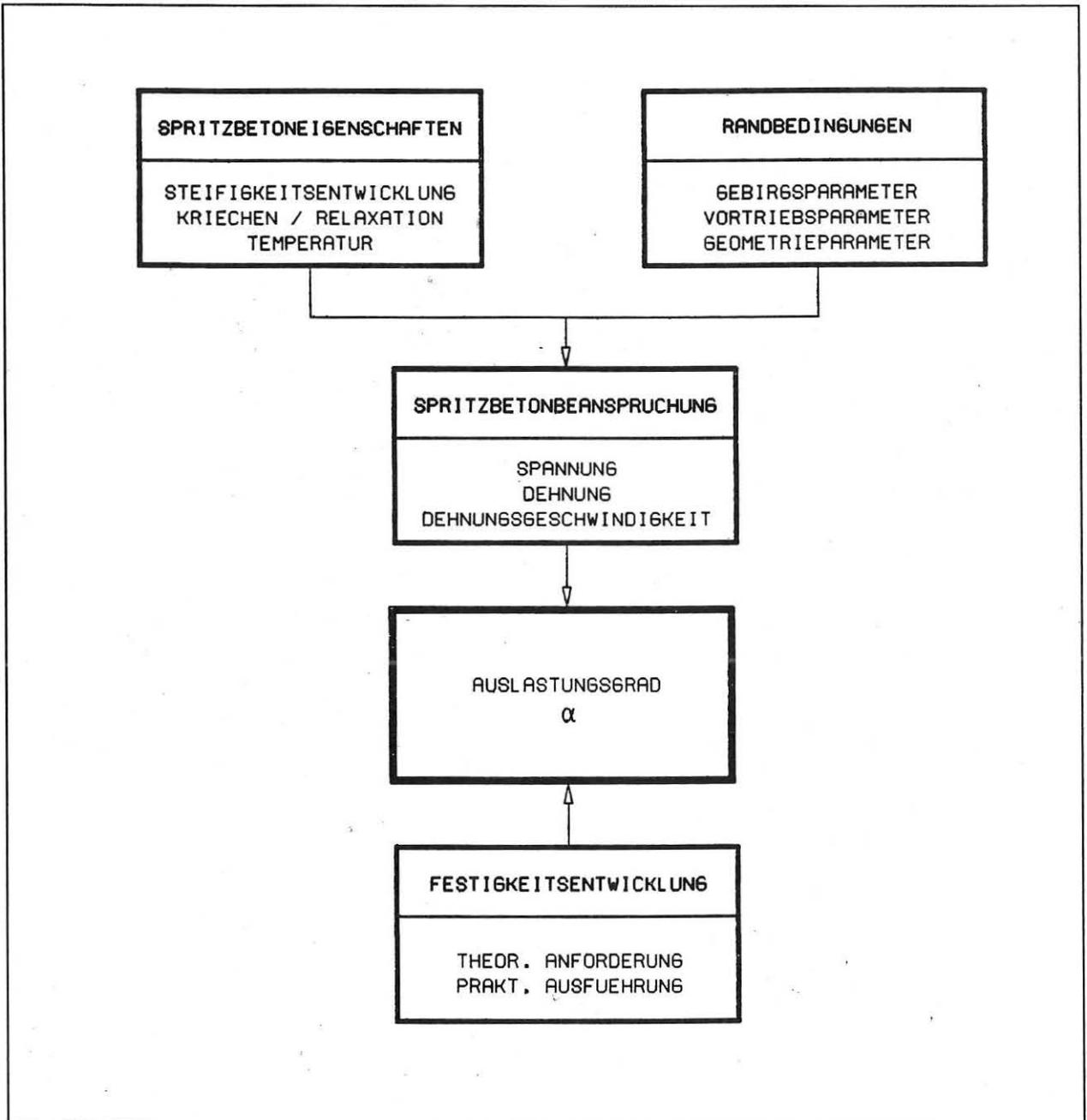


Bild 1: Einflußfaktoren auf den Auslastungsgrad

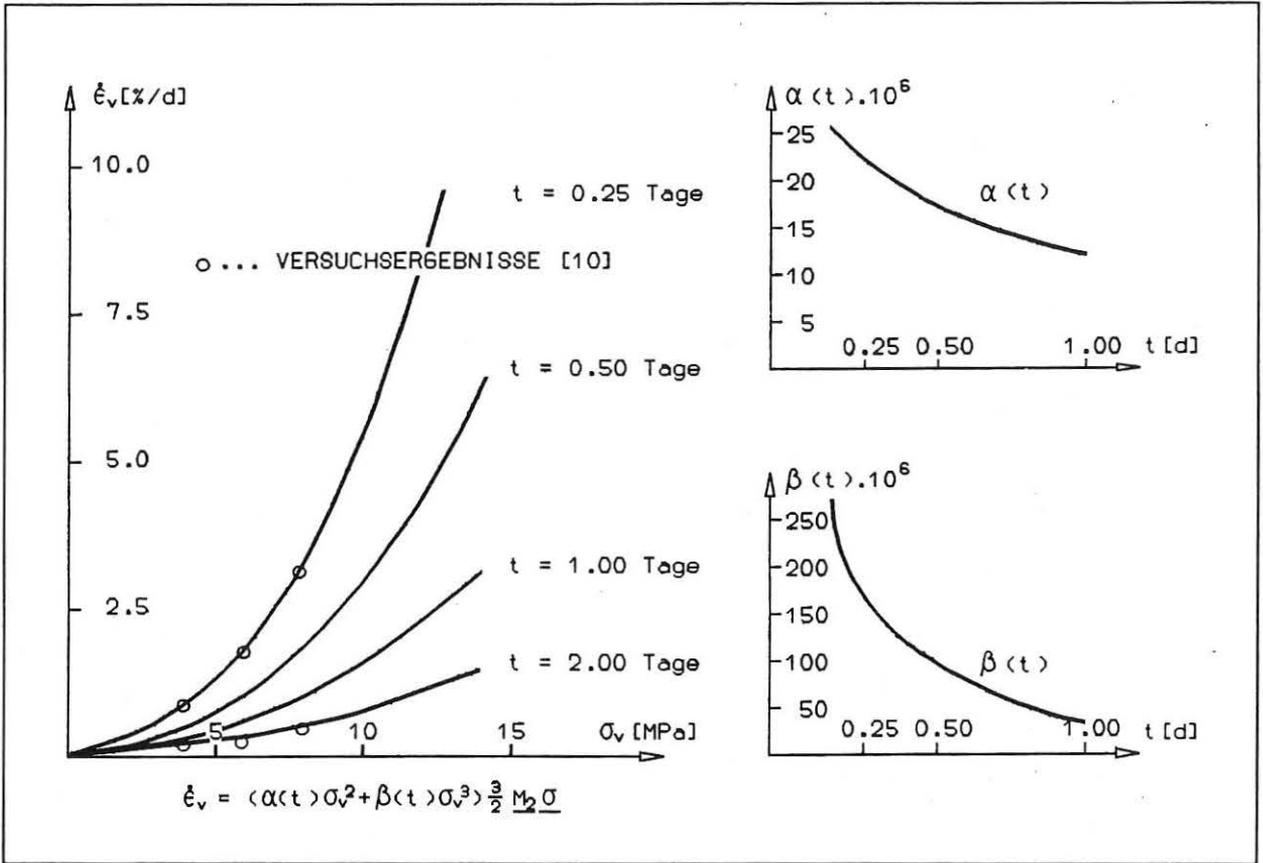


Bild 2: Viskose Verzerrungsgeschwindigkeit als Funktion der Vergleichsspannung

Die Spritzbetoneigenschaften, gekoppelt mit den Randbedingungen, ergeben die Spritzbetonbeanspruchung. Die Beanspruchung, gegenübergestellt den Anforderungen lt. Ausschreibung bzw. den tatsächlichen Spritzbetonfestigkeiten erhalten aus Labor- oder In-situ-Versuchen, ergibt den theoretischen bzw. den tatsächlichen Auslastungsgrad, der damit eine äußerst komplexe Abhängigkeit erhält.

4. Verformungs- und Spannungsverhalten des jungen Spritzbetons

Unter Anwendung des Boltzmann'schen Theorems läßt sich die Verzerrung $\Delta \underline{\epsilon}$ im Zeitintervall t durch folgenden Stoffgesetzansatz beschreiben:

$$\Delta \underline{\epsilon} = \Delta \underline{\epsilon}^{el} + \Delta \underline{\epsilon}^{th} + \Delta \underline{\epsilon}^v \tag{2}$$

$\Delta \underline{\epsilon}^{el}$ stellt dabei den elastischen, $\Delta \underline{\epsilon}^{th}$ den thermischen und $\Delta \underline{\epsilon}^v$ den viskosen Verzerrungsanteil dar.

$$\Delta \underline{\epsilon}^{el} = \underline{D} \cdot \Delta \underline{\sigma} \tag{3}$$

\underline{D} ist die Elastizitätsmatrix, die als wesentlichen Parameter den zeitabhängigen Elastizitätsmodul beinhaltet. Die Steifigkeitsentwicklung des Spritzbetons kann näherungsweise mit der empirischen, für Normalbeton entwickelten Formel /7/ beschrieben werden:

$$E_t = E_{28} \cdot a \cdot \exp(c/t^{0,6}) \tag{4}$$

E_t ... Elastizitätsmodul zur Zeit t in Tagen
a,c ... Parameter
t ... Zeit in Tagen

Der thermische Verzerrungsanteil unter einer Temperatureinwirkung T [K] im 3-dimensionalen Spannungszustand beträgt

$$\Delta \underline{\epsilon}^{th} = \underline{D} \quad \underline{\epsilon}_0 = \alpha_t T \underline{D} [1,1,1,0,0,0]^T \quad (5)$$

Als Temperaturkoeffizient $\alpha_t(t)$ kann

$$\alpha_t(0 - 1 \text{ Tag}) = 15 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$$

angesetzt werden. Diese Annahme stellt eine auf umfangreichen Versuchen /8/ basierende Näherung dar. Temperatur- oder temperaturäquivalente Beanspruchungen des jungen Spritzbetons sind das Schwinden und der Temperaturverlauf infolge des Hydratationsprozesses. Während auf das Schwinden aufgrund der vernachlässigbaren Größe am 1. Tag hier nicht eingegangen wird, soll der Temperaturverlauf infolge Hydratation untersucht werden. Der Temperaturanstieg des Spritzbetons infolge des Hydratationsprozesses kann linear mit der Zeit angesetzt werden. Für dicke Spritzbetonschichten ist mit einer Erwärmung von 8,3 K und für dünne von 10 K am ersten Tag zu rechnen /9/.

Der viskose Verzerrungsanteil (Kriechen, Relaxation) ergibt sich aus:

$$\Delta \underline{\epsilon}^v = \int_t^{t+\Delta t} \underline{\dot{\epsilon}}^v dt = \Delta t \underline{\dot{\epsilon}}^v(t) \quad (6)$$

Für die Kriechrate $\underline{\dot{\epsilon}}^v$ wird in /10/ ein Ansatz mit Zeitverfestigung vorgeschlagen, der in Bild 2 als Funktion der Vergleichsspannung σ_v dargestellt ist. Kurvenparameter ist die Zeit t. Zum Vergleich sind auch die versuchsmäßig ermittelten Kriechraten aufgetragen, woraus die gute Übereinstimmung zwischen numerischem Ansatz und Versuchsergebnissen insbesondere für geringes Spannungsniveau hervorgeht. Es zeigt sich jedoch, daß für hohe Vergleichsspannungen die in /10/ angegebenen Parameter eine Umkehrung der Tendenz ergeben, d.h. je höher die Spannung ist, desto geringer ist die Kriechrate. Daher ist es zweckmäßig das Kriechgesetz in der Form eines Polynoms mit zeitabhängigen Koeffizienten zu modifizieren, das die beschriebene Unzulänglichkeit nicht aufweist.

$$\underline{\dot{\epsilon}}^v = (\alpha(t) \sigma_v^2 + \beta(t) \sigma_v^3) 3/2 \underline{M}_2 \underline{\sigma} \quad (7)$$

- \underline{M}_2 Filtermatrix
- $\underline{\sigma}$ Spannungsvektor
- $\alpha(t), \beta(t)$ Zeitkoeffizienten Bild 2

5. Überlegungen zur Frühfestigkeit des jungen Spritzbetons

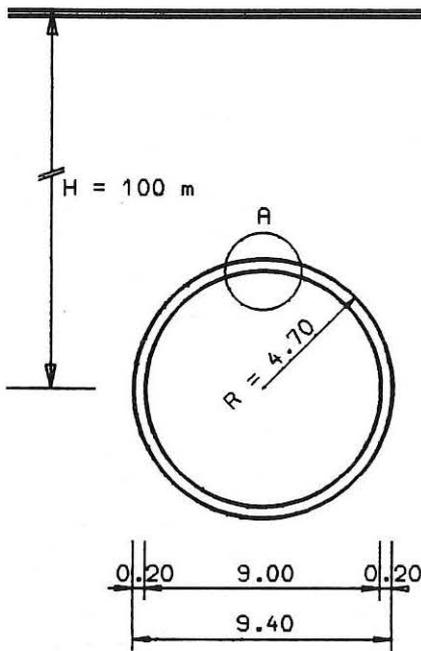
Bei üblichen Ingenieurbauwerken kann generell davon ausgegangen werden, daß je höher die Festigkeit des Baustoffes ist, desto besser, günstiger, sicherer ist das Bauwerk. Diese Feststellung gilt auch für Tunnel mit Spritzbetonauskleidung, sie muß jedoch auf einen bestimmten Zeitpunkt bezogen werden.

Durch Anhebung der Frühfestigkeit leidet die Endfestigkeit des Spritzbetons /4, 8/. Der Ingenieur muß hier zwischen einer höheren Sicherheit im Vortriebsbereich und einer niedrigeren Sicherheit auf Dauer oder einer vorübergehend niedrigeren Sicherheit im Frühstadium dafür aber einer auf Dauer höheren Sicherheit entscheiden. Anzustreben ist eine möglichst niedrige, jedoch ausreichende Frühfestigkeit des Spritzbetons. Bei der Festlegung dieses Mindestwertes sind zwei für den Spannungs-Verformungszustand des jungen Spritzbetons spezifische Punkte zu beachten:

- Kriechverformungen des Spritzbetons sind bis zu einem Auslastungsgrad $\alpha < 0,40$ linear zu den vorhandenen Spannungen. Höhere Auslastungsgrade $0,40 < \alpha < 0,80$ führen zu überproportionalen Kriechverformungen und können vor allem bei nachdrängenden Lasten zum Kriechbruch führen /6, 14/.
- Bei hohen Auslastungsgraden im frühen Betonalter kommt es zu einer wesentlichen Störung der Mikrostruktur des Spritzbetons, die, da sie nicht mehr heilt, zu einer Beeinträchtigung der Endfestigkeit führt /4, 8/.

Die Festlegung der Frühfestigkeit des Spritzbetons gleicht damit einer Gradwanderung, die erheblich durch die Kenntnis der tatsächlichen Beanspruchung des Spritzbetons erleichtert werden kann. Durch die heutige Labor- und Computertechnik ist es möglich, Spritzbetonspannungen im ortsbreustnahen Bereich bereits im Planungsstadium abzuschätzen. Daß diese auf Labordaten und Numerik beruhende Abschätzung insbesondere bei der NÖT nur die eine Seite der Medaille ist und diese durch Messungen der tatsächlichen Spritzbetonbeanspruchung ergänzt, bestätigt oder korrigiert werden muß, ist selbstverständlich. Hier sei zum Beispiel auf das neue Verfahren der Dehnungsmessung im jungen Spritzbeton /11, 16/ hingewiesen. Die in /16/ angeführte Rückrechnung von Momenten und Normalkräften wurde in /13/ kritisch untersucht.

Anhand von 2 Parameterstudien mit unterschiedlicher Gebirgscharakteristik einer nachdrängenden und einer nicht nachdrängenden Belastung soll im

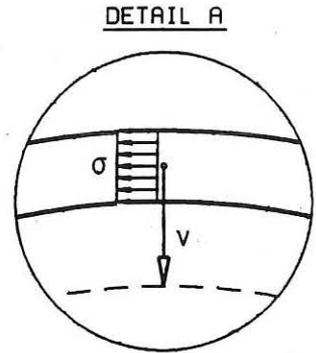


GEBIRGE:

$E_{\text{GEB}} = 1000 \text{ MPa}$
 $\nu = 0.30$
 $\gamma = 0.024 \text{ MN/m}^3$

SPRITZBETON:

$E_1 = 16720 \text{ MPa}$
 $E_{28} = 30000 \text{ MPa}$
 $a = 1.084$
 $c = -0.596 \text{ [7]}$



ABSCHLAGSLAENGE 1.00 m
 ABSCHLAGES PRO TAG 4
 VORENTSPANNUNG (α_v) 0.30
 VERZOEGERTE ELASTIZITAET (ν_E) 25 % [13]

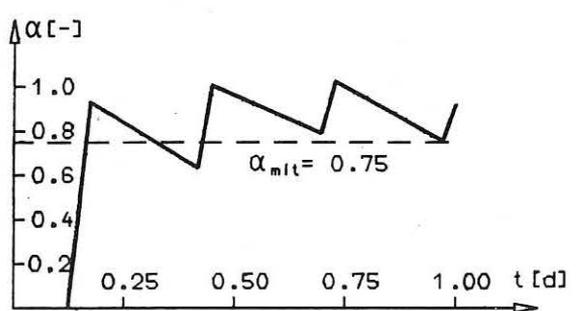
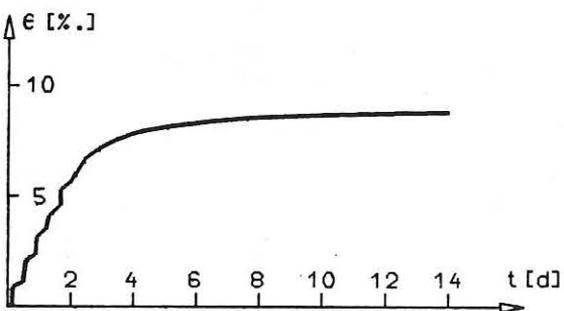
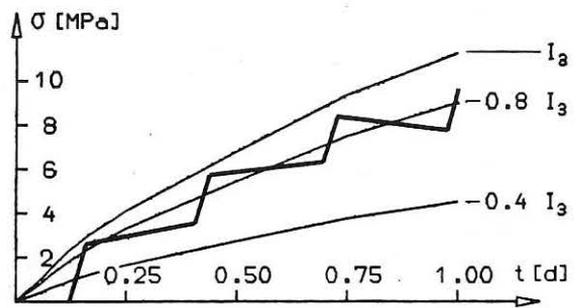
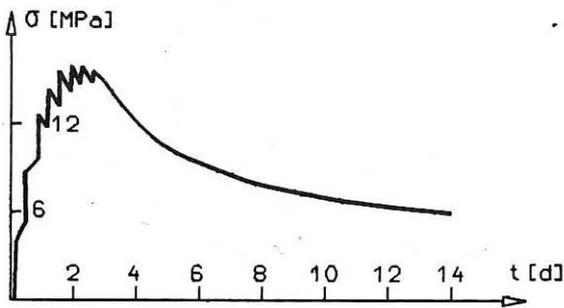


Bild 3: Parameterstudie: idealer Gebirgstragung Referenzmodell, Spannungs-Verformungsverhalten, Auslastungsgrad α

folgenden die Beanspruchung des jungen Spritzbetons auf numerischen Weg ermittelt werden.

6. Parameterstudien

6.1 Ideale Gebirgstragung - Nicht nachdrängende Last

Das Referenzmodell ist in **Bild 3** dargestellt. Das Gebirgsverhalten ist ideal elastisch und durch eine verzögerte Elastizität geprägt. Unter verzögerter Elastizität des Gebirges wird verstanden, daß nur ein Teil der durch den Abschlag aktivierten Last sofort die Spritzbetonschale belastet, der restliche Teil (v_E in %) wird erst im Laufe der Zeit aktiviert /13/. Dadurch wird die Relaxation des Spritzbetons, die bei rein elastischem Gebirgsverhalten (**Bild 4**) unmittelbar nach erfolgtem Abschlag einsetzt, teilweise kompensiert.

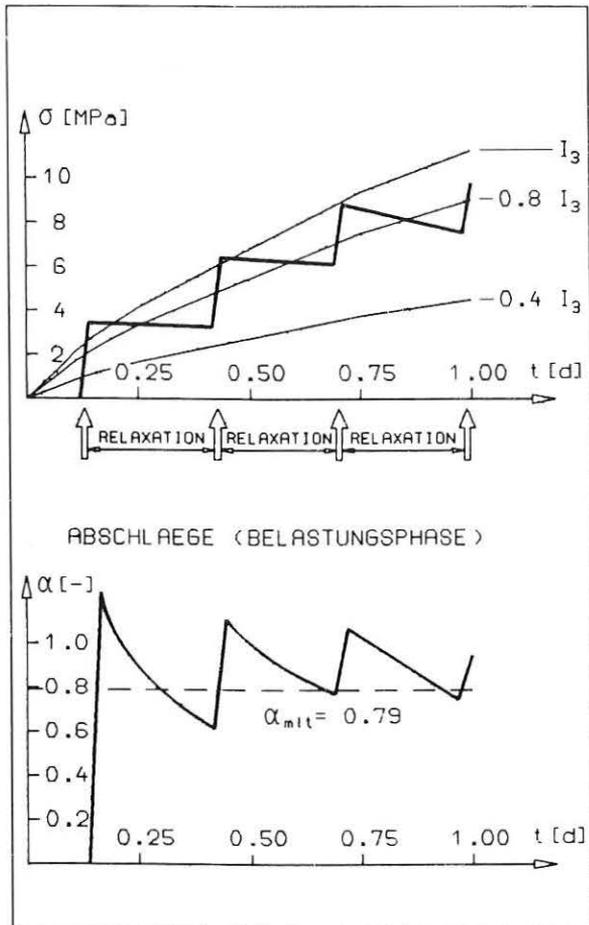


Bild 4: Belastung und Relaxation des Spritzbetons bei rein elastischem Gebirgsverhalten

Der Tunnel wird mit 4 Abschlägen pro Tag mit einer Abschlagslänge von 1,00 m vorgetrieben. Der Steifigkeitsanstieg des Spritzbetons wird durch die

empirische Formel Glg. 4 beschrieben. Zur Berücksichtigung der Hydratation werden 8,3 K Temperaturanstieg am 1. Tag berücksichtigt.

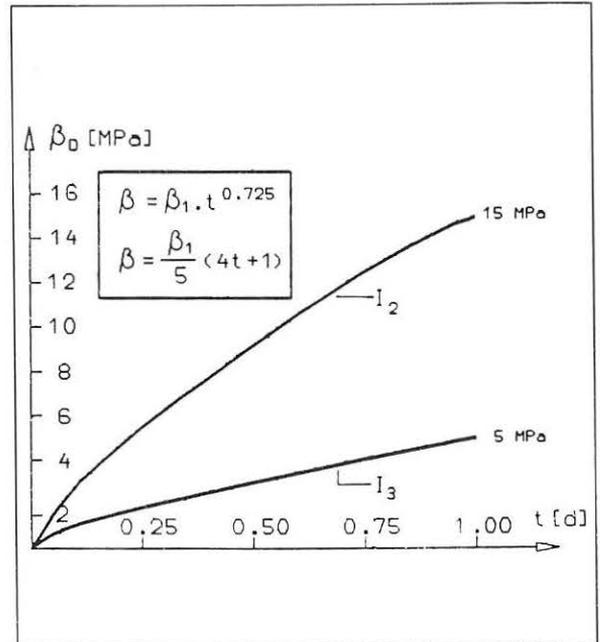


Bild 5: Spritzbetonfestigkeiten nach /1/

Ausgehend vom beschriebenen Referenzmodell, dessen Verhalten in **Bild 3** dargestellt ist, werden die maßgebenden Parameter variiert. Gegenüber dem Referenzmodell wird jeweils nur ein Wert geändert. Um den Beanspruchungsgrad des Spritzbetons quantifizieren zu können, werden die auftretenden Spritzbetonspannungen mit den Spritzbetonfestigkeiten I_3 entsprechend /1/ verglichen. In **Bild 5** ist die Prismenfestigkeit für Spritzbeton der Festigkeitsklasse I_2 und I_3 dargestellt. Näherungsweise kann diese für ein Spritzbetonalter von 1 Tag wie folgt berechnet werden.

$$\beta_t = \beta_1 \cdot t^{0,72453} \quad (8)$$

oder noch einfacher

$$\beta_t = \frac{\beta_1}{5} (1+4t) \quad (9)$$

t Alter in Tagen

β_t Festigkeit nach t Tagen

Der für statisch konstruktive Erfordernisse relevante Bereich wird dabei mit einem Spritzbetonalter beginnend mit 2 Stunden angesetzt /15/.

Variierter Parameter 1	α_{mit} [-] 2	α_{max} [-] 3	t_{max} [Tage] 4	Anmerkung 5
Referenzmodell	0,75	1,02	0,65	Bild 3
$E_{GEB} = 2000 \text{ MPa}$ 500 MPa	0,53 1,00	0,74 1,35	0,65 0,40	Gebirgsmodul
$v_E = 0 \text{ ‰}$ 50 ‰	0,79 0,70	1,24 0,96	0,15 0,65	verzögerte Elastizität
$\sigma_{PRIM} = 1,2 \text{ MPa}$ $4,8 \text{ MPa}$	0,43 1,18	0,60 1,86	0,65 0,13	Primärspannungszustand
$v = 4 \times 0,5 \text{ m/Tag}$ $4 \times 2,0 \text{ m/Tag}$ $4 \times 4,0 \text{ m/Tag}$	0,45 1,06 1,29	0,64 1,75 3,01	0,65 0,13 0,13	Vortriebsgeschwindigkeit
$\alpha = 0,50$ $0,10$	0,57 0,91	0,79 1,25	0,65 0,40	Vorentspannung
$E_{28} = 20000 \text{ MPa}$ 40000 MPa	0,64 0,82	0,89 1,13	0,65 0,40	28-Tages E-Modul SPB
$E_1 = 12700 \text{ MPa}$ 19000 MPa	0,63 0,80	0,88 1,09	0,65 0,40	1-Tages E-Modul SPB
$T = 0 \text{ K/Tag}$ 10 K/Tag	0,69 0,78	0,94 1,06	0,40 0,65	Hydratationswärme
$R = 6,00 \text{ m}$ $3,00 \text{ m}$	0,85 0,67	1,16 0,93	0,40 0,65	Ausbruchradius
$d = 0,10 \text{ m}$ $0,30 \text{ m}$	0,90 0,65	1,26 0,88	0,40 0,65	Spritzbetonstärke

Tab. 1: Die wesentlichen Ergebnisse der Parameterstudie

Spalte 1: veränderter Parameter

Spalte 2: α_{mit} mittlerer Auslastungsgrad

Spalte 3: α_{max} maximaler Auslastungsgrad

Spalte 4: t_{max} Zeitpunkt zu dem α_{max} auftritt

In Bild 6 sind die mittleren Auslastungsgrade als Funktion der Eingabeparameter dargestellt. Auf der Ordinate ist der mittlere Auslastungsgrad und auf der Abszisse die prozentmäßige Abweichung des aktuellen Parameterwertes vom Wert des im Referenzmodell verwendeten Parameters aufgetragen. Dabei wurde unabhängig vom Vorzeichen der Veränderung die Darstellung so gewählt, daß der niedrigere Auslastungsgrad links vom Bezugswert des Referenzmodells zu liegen kommt. Wie aus Bild 6 hervorgeht, liegt im untersuchten Bereich ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen der Parametervariation und dem Auslastungsgrad vor, der durch

$$\alpha = \alpha_{REF} + \frac{|P - P_{REF}|}{P_{REF}} \cdot \Gamma \cdot 0,25$$

$$\Gamma = \text{signum} \left(\frac{\partial P}{\partial \alpha} \right)$$
(10)

α_{REF} Auslastungsgrad Referenzmodell

P_{REF} Parameterwert des Referenzmodells

P aktueller Parameterwert

Γ +1, falls der Parameter den Auslastungsgrad vergrößert

Γ -1, falls der Parameter den Auslastungsgrad verkleinert

definiert wird.

Für die Änderung mehrerer Parameter gegenüber dem Referenzmodell gilt näherungsweise

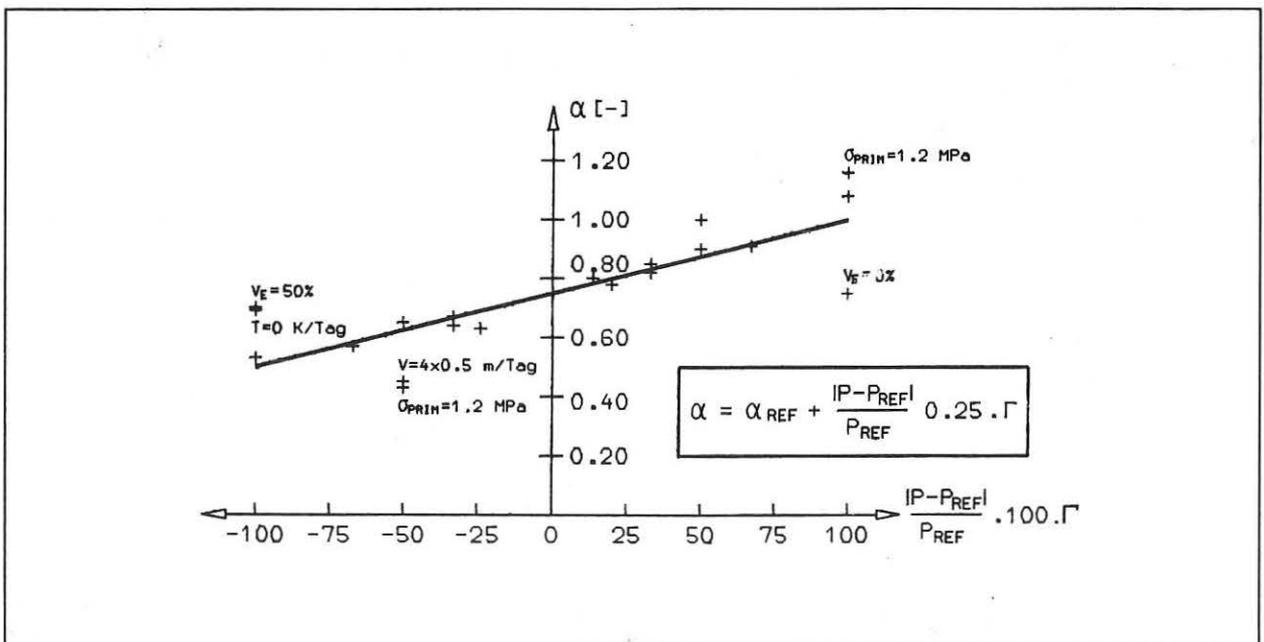


Bild 6: Modell idealer Gebirgstragung: Auslastungsgrad α als Funktion der Eingabeparameter

$$\alpha = \alpha_{REF} + 0,25 \cdot \frac{n}{i=1} \cdot \pi \cdot \left(1 + \frac{|P_i - P_{REF}|}{P_{REF}} \cdot \Gamma_i\right) \quad (11)$$

Einen gegenüber Glg. 10 geringfügig ausgeprägteren Einfluß auf den Auslastungsgrad haben den Primärspannungszustand und die Vortriebsgeschwindigkeit. Dies gilt vor allem für abnehmende Vortriebsgeschwindigkeit und geringeres Primärspannungsniveau, für die der Auslastungsgrad überproportional abnimmt. Einen wesentlich geringeren Einfluß haben dagegen die verzögerte Elastizität und die Hydratationswärme. Durch die Hydratationswärme wird in der Anfangsphase eine Entlastung des Spritzbetons verhindert, da bei dem in dieser Phase vorhandenen niedrigen Spannungsniveau die Relaxationstendenz durch Temperaturstauchung kompensiert wird. Erst bei einem später höheren Spannungsniveau überwiegt das überproportionale Kriechen und eine deutliche Spannungsverminderung wird sichtbar.

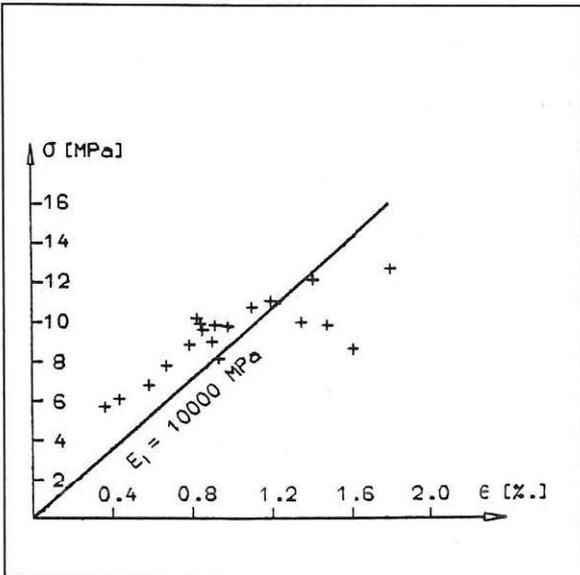


Bild 7: Spannungsdehnungszustand des Spritzbetons im $\sigma - \epsilon$ Diagramm nach 1 Tag

In Bild 7 ist der Spannungs-Dehnungszustand des 1 Tag alten Spritzbetons im $\sigma - \epsilon$ Diagramm dargestellt. Es zeigt sich, daß das Verhältnis Spannung zu Dehnung wesentlich weniger variiert als die Eingabeparameter. Dies ist auf das Verbundsystem Spritzbeton/ Gebirge und auf das ausgeprägte rheologische Verhalten des Spritzbetons zurückzuführen. Das Spannungs-Verformungsverhalten des jungen Spritzbetons kann daher auch durch den Ansatz eines ideellen Elastizitätsmodul erfaßt werden /13/. Außerdem ist aus Bild 7 ersichtlich, daß selbst bei mittleren Auslastungsgraden bereits nach

einem Tag eine Stauchung des Spritzbetons von 1,5 ‰ auftritt. Dieser im Vergleich zur Stahlbetonnorm ÖN B 4200 relativ hohe Wert zeigt, daß für Spritzbeton eine Beurteilung der Standsicherheit auf reiner Dehnungsbasis unter Zugrundelegung der Betonarbeitslinie nicht sinnvoll ist. Diese teilweise geübte Praxis ergibt falsche, äußerst konservative, mit der NÖT nicht immer im Einklang stehende Spritzbetonstärken. Wie Versuche zeigen, sind Spritzbetonstauchungen von wesentlich mehr als in der ÖN B 4200 dargelegten Grenzwerten aufnehmbar, ohne daß die Sicherheit des Bauwerkes leidet /6/.

6.2 Lastglocke - Nachdrängende Last

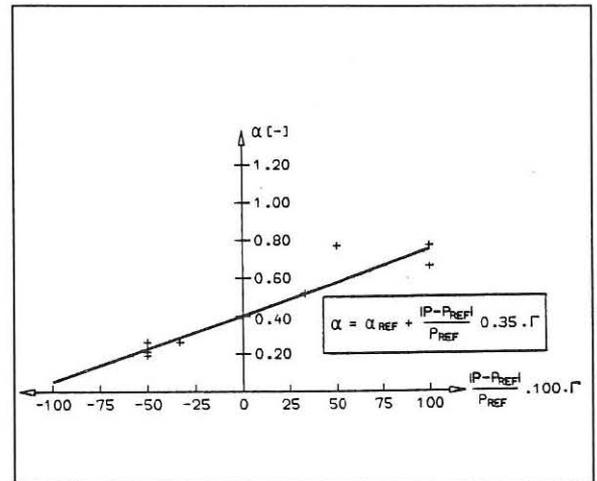


Bild 8: Modell Lastglocke: Auslastungsgrad α als Funktion der Eingabeparameter

Diese Parameterstudie, die die Verhältnisse des Südabschnittes der Tunnel der Neubaustrecke Hannover - Würzburg der Deutschen Bundesbahn erfaßt /12/, ist in Bild 9 dargestellt. Die Spritzbetonschale wird durch eine Lastglocke belastet. Die Kennwerte des Spritzbetons und die Lastentwicklung wird analog zur bereits beschriebenen Parameterstudie angesetzt. Nicht untersucht wurde eine verzögerte Elastizität des Gebirges, da eine solche beim vorliegenden Modell nicht sinnvoll ist. Ebenso wurde auf die Variation der Elastizitätsmoduli des Spritzbetons verzichtet, da diese die Spannung nicht und die Verformung nur geringfügig beeinflussen. Der wesentliche Unterschied zu den Spannungsverläufen bei nicht nachdrängenden Lasten ist das Fehlen der Relaxationsphase. Es bestehen keine Umlagerungsmöglichkeiten von der Spritzbetonschale ins Gebirge. In Tabelle 2 sind die zur Tabelle 1 analogen Werte aufgelistet. Der mittlere Auslastungsgrad ist als Funktion der variierten Parameter in Bild 8 dargestellt. Wiederum ist ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen der

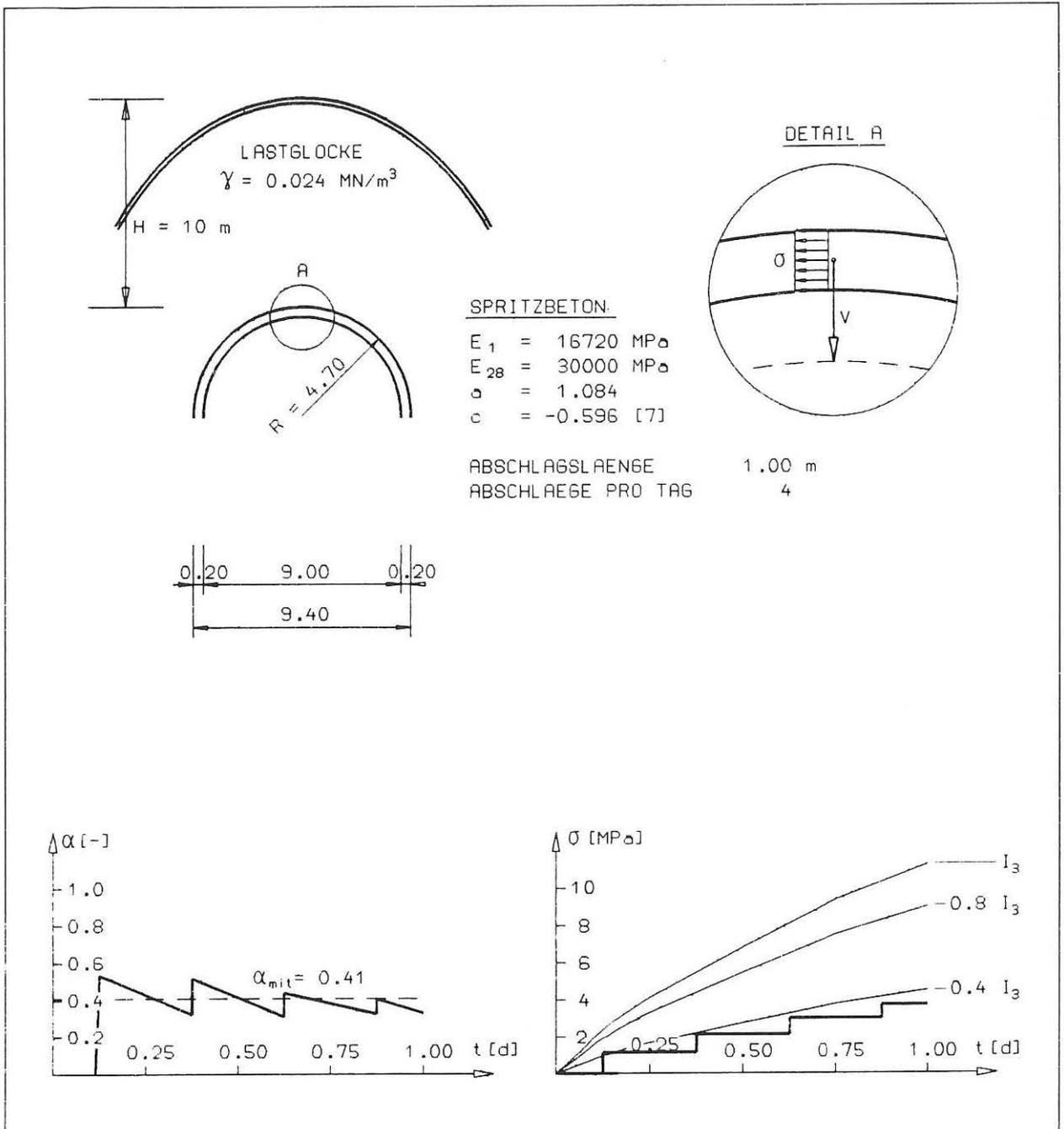


Bild 9: Parameterstudie: Lastglocke

Variation der Parameter und dem Auslastungsgrad gegeben.

$$\alpha = \alpha_{REF} + \frac{|P - P_{REF}|}{P_{REF}} \cdot \Gamma \cdot 0,35 \quad (12)$$

Allerdings ändert sich der Auslastungsgrad stärker mit einer Variation der Parameter als bei einem idealen Gebirgstragring. Dies ist auf die nicht vorhandene Umlagerungsmöglichkeit beim zu-

grunde liegenden Modell zurückzuführen. Aus Bild 8 geht hervor, daß bei einer Variation der Parameter nach oben mit einer größeren Abweichung der Auslastungsgrade von Glg. 12 zu rechnen ist. Insbesondere durch Vergrößern der Spritzbetonstärke nimmt der Auslastungsgrad stark ab.

7. Zusammenfassung

Auf der Grundlage neuester Forschungsergebnisse wurde die Spritzbetonbeanspruchung im Ortsbrustbereich ermittelt. Untersucht wurden die

Varierte Parameter 1	α mit [-] 2	α max [-] 3	t_{max} [Tage] 4	Anmerkung 5
Referenzmodell	0,41	0,54	0,13	Bild 9
H = 20,0 m 5,0 m	0,77 0,19	1,04 0,26	0,38 0,38	Lastglocken- höhe
v = 4 x 0,5 m/Tag 4 x 2,0 m/Tag 4 x 4,0 m/Tag	0,21 0,66 0,91	0,27 0,91 1,49	0,38 0,38 0,13	Vortriebsge- schwindig- keit
R = 3,00 m 6,00 m	0,26 0,52	0,36 0,69	0,38 0,38	Ausbruchs- radius
d = 0,10 m 0,30 m	0,77 0,26	1,04 0,36	0,38 0,38	Spritzbeton- stärke

Tab. 2: Auslastungskennwerte für einen Tunnelvortrieb bei nachdrängenden Lasten

beiden Extremfälle idealer Gebirgstragring und nachdrängende Lastglocke. Aufbauend auf einem Referenzmodell wurden für dieses sowie den daraus durch Variation der maßgeblichen Parameter entwickelten Folgemodellen die Auslastungskennwerte ermittelt. Wenn auch die daraus gewonnenen und abzuleitenden Schlußfolgerungen für die Praxis ein "alter Hut" sind, so ist hier doch eine sonst nicht mögliche Quantifizierung der Einflüsse vorgenommen worden. Einen wesentlichen Einfluß auf die Tragfähigkeit des Spritzbetons haben auftretende Momente, die zu einer Einschnürung des Querschnittes führen. Diese wurden jedoch in der vorliegenden Arbeit aus Übersichtlichkeitsgründen nicht mitberücksichtigt.

Durch das Relaxationsvermögen des jungen Spritzbetons nimmt der Auslastungsgrad des Spritzbetons bei Vorliegen eines Gebirgstragringes mit der Zeit stärker ab als im Fall von nachdrängenden Lasten. Wenn es zu Überbeanspruchungen kommt, so treten diese in der Regel bereits zu einem sehr frühen Zeitpunkt auf. Überbeanspruchungen beim Auftreten einer nachdrängenden Last sind generell kritischer als bei Vorhandensein eines Gebirgstragringes. Durch die Charakteristik der Spritzbetonbeanspruchung (Bild 3 und 9) tritt beim Gebirgstragring die Überbeanspruchung nur kurzfristig auf und nimmt durch das Relaxationsvermögen des Spritzbetons und die vorhandene Umlagerungsmöglichkeit der Kräfte von der Spritzbetonschale ins Gebirge rasch sehr stark ab.

Bei nachdrängenden Lasten kann der Überbeanspruchung des Spritzbetons durch eine Verstärkung der Schale begegnet werden, während im Fall des idealen Gebirgstragringes eine Verstärkung weniger Effekt zeigt. Hier sind entsprechende Entlastungsschlitze im Spritzbeton anzuordnen.

Der Verlauf der Spritzbetonbeanspruchung zeigt generell, daß die punktuelle Festigkeitsanforderung z.B. 10 N/mm² nach 24 h zwar seine Berechtigung hat, jedoch nicht immer ein ausreichendes Kriterium, unabhängig von der Höhe des Wertes, ist. Der im Bild 3 und Bild 9 dargestellte Vergleich zwischen der auftretenden Spannung und der Festigkeitsanforderung der "Richtlinie Spritzbeton" zeigt, daß diese affin verlaufen. Dies geht auch aus dem ebenfalls dargestellten Auslastungsgrad hervor, der in derselben Größenordnung um einen Mittelwert oszilliert. Dadurch wird dokumentiert, daß die Festigkeitsanforderungen der "Richtlinie Spritzbeton" praxisbezogen definiert wurden.

"Das der Parameterstudie zugrundegelegte Modell des Spritzbetonverhaltens basiert auf den Versuchen von Petersen und Rokahr /10/. Aufgrund der spezifischen Versuchsdurchführung ergeben die daraus ermittelten Parameter rechnerisch ein geringeres Kriechmaß als tatsächlich in der Anfangsphase auftritt. Die Rechenergebnisse liegen auf der konservativen Seite. Ein Wunsch der Numeriker ist daher weitere reproduzierbare Kriech- und Relaxationsversuche, um ein noch realistischeres Erfassen des Verformungsverhaltens des jungen Spritzbetons zu ermöglichen."

8. Literatur:

- /1/ **ÖBV:**
Richtlinie Spritzbeton Teil 1 - Anwendung
Ausgabe Jänner 1989.
- /2/ **Huber H.:**
Einführung in die Richtlinie Spritzbeton. Zement und Beton, 34, 1989.
- /3/ **Deix F.; Gobiet W.:**
Auswirkungen der neuen Richtlinie Spritzbeton auf Planung und Ausschreibung. Zement und Beton, 34, 1989.
- /4/ **Kusterle W.:**
Einflüsse auf Frühfestigkeit und Endfestigkeit des Spritzbetons. Zement und Beton, 34, 1989.
- /5/ **Huber H.:**
Richtlinie "Spritzbeton" des Österreichischen Betonvereins. Spritzbeton-Technologie. Hrsg: Institut für Baustofflehre und Materialprüfung W. Lukas und W. Kusterle, Universität Innsbruck, 1987.
- /6/ **Rokahr R.B.; Lux K.H.:**
Einfluß des rheologischen Verhaltens des Spritzbetons auf den Ausbauwiderstand. Felsbau 5, 1987.

- /7/ Weber, J.W.:**
Emprische Formeln zur Beschreibung der Festigkeitsentwicklung und der Entwicklung des E-Moduls von Beton. Betonwerk- und Fertigteiltechnik, 1979.
- /8/ Byfors, I.:**
Plain concrete at Early Ages. Forskning Research Fo. 3:80, Swedish Cement and Concrete Research Institut, Stockholm, 1980.
- /9/ Breitenbücher R.:**
Zwangsspannungen und Reißbildung infolge Hydratationswärme. Dissertation TU München, 1989.
- /10/ Petersen A.:**
Geostatische Untersuchungen für tiefliegende Regionalbahnen am Beispiel Hannover. Forschungsergebnisse aus dem Tunnel- und Kavernenbau. Heft 12, Universität Hannover 1989.
- /11/ Schubert P.:**
Beitrag zum rheologischen Verhalten von Spritzbeton. Felsbau 6, 1988.
- /12/ John M.; Pöttler R.:**
Entwurf und Standsicherheitsbetrachtungen für die Eisenbahntunnel der Neubaustrecke Hannover-Würzburg. Felsbau 2, 1984.
- /13/ Pöttler R.:**
Konsequenzen für die Tunnelstatik aufgrund des nichtlinearen Materialverhaltens von Spritzbeton. Felsbau 8, 1990
- /14/ Vavrovsky G.M.:**
Wo liegen die Grenzen der NÖT. Tunnel 3, 1987.
- /15/ Huber H.:**
Diskussionsbeitrag zum Thema "Wirkungsweise Spritzbeton im Tunnelbau". Felsbau 6, 1988.
- /16/ Golser J., Schubert P. and Rabensteiner K.:**
A new concept for evaluation of loading in shortcrete linings. Congress on Progress and Innovation in tunneling, Toronto, 1989.
- /17/ Detzelhofer H.:**
Die Stollenarbeiten für das Innkraftwerk Prutz-Imst der Tiroler Wasserkraftwerke AG. Montan-Rundschau, 1960.
- /18/ Kastner H.:**
Einige beim Bau des Druckstollenabschnittes Lend gewonnene Erfahrungen. ÖZE Kraftwerk Schwarzach, 1959.
- /19/ Sattler K.:**
Österreichische Tunnelbauweise - Statische Wirkungsweise und Bemessung. Bauingenieur, 1965.
- /20/ Zienkiewicz O.C.:**
The Finite Element Method in Engineering Science. Mc Graw Hill. London, 1971.
- /21/ Rabcewicz L.V.:**
Österreichisches Patent Nr. 165573, 1950.
- /22/ Pöttler R.:**
Ideeller Elastizitätsmodul zur Abschätzung der Spritzbetonbeanspruchung bei Felshohlraumbauten. Felsbau 3, 1985.