

---

# Die neue Österreichische Tunnelbaumethode als einschalige Bauweise

---

THE NEW AUSTRIAN TUNNELING METHOD WITH SINGLE-SHELL SHOTCRETE LINING

JOHANN GOLSER, MONTANUNIVERSITÄT LEOBEN; JOHANN BRANDL, INGENIEURBÜRO GEOCONSULT, SALZBURG

Endgültige Tunnelausbauten in Spritzbeton sind nichts Neues, man denke dabei nur an den Wasserstollenbau, Kavernenbau und Teile des Verkehrstunnelbaues.

Es gibt Ausführungsbeispiele als "echte" einschalige Bauweise, d.h. der primäre Ausbau dient als permanenter Ausbau und es gibt solche wo die Außenschale durch eine zweite Spritzbetonlage verstärkt wird.

Schon in der Patentschrift 1948 weist Prof. Rabcewicz darauf hin, daß unter bestimmten Voraussetzungen auf eine Innenschale verzichtet werden kann.

Nicht zufriedenstellend gelöst sind bisher die Frage des statischen Zusammenwirkens von kombinierten Spritzbetonschalen und die Wasserdichtigkeit.

Äußere und innere Spritzbetonschale haben unterschiedliche Auslastungsgrade bzw. Beanspruchungen. Durch die erwünschte innige Verzahnung beider Schalen ergeben sich Schwierigkeiten in den Sicherheitsbetrachtungen, insbesondere dann, wenn die äußere Spritzbetonschale schon beschädigt ist.

Das ausgeprägte Kriechvermögen des Spritzbetons erleichtert das "Zusammenwirken" der beiden Spritzbetonschalen.

*Permanent shotcrete linings are nothing new. Numerous examples can be cited in the fields of water gallery, cavern and traffic tunnel construction.*

*There are examples of "genuine" single-shell shotcrete linings, i.e. the primary lining serves as permanent lining, and there are cases in which the outer lining is reinforced by a second layer of shotcrete.*

*In his patent specification of 1948 Prof. Rabcewicz already points out that under certain circumstances there may be no need for an inner lining.*

*No satisfactory solutions have yet been found as to the structural bond of two shotcrete linings and watertightness.*

*The outer and inner shotcrete lining show different utilization factors and/or stresses and strains. Because of the desired close bond of the two linings, there are concerns regarding safety considerations, especially if the outer shotcrete lining is already damaged.*

*The pronounced creep capacity of shotcrete facilitates the "interaction" of the two shotcrete linings.*

Arbeitsteilige Produktionen über Kontinente hinweg, Bevölkerungswachstum und Menschenkonzentrationen in Ballungszentren sowie der Drang nach Mobilität verlangen umfangreiche Investitionen in Verkehrsinfrastrukturen.

Für die Lösung von Verkehrs- und Versorgungsfragen gewinnen Tunnels aus verschiedenen Gründen immer mehr an Bedeutung. Tunnels müssen in Zukunft kostengünstiger und in kürzerer Zeit hergestellt werden.

## 1. Grundsätzliches

Seit den Anfängen der Neuen Österreichischen Tunnelbaumethode vor mehr als 30 Jahren wurden Tunnels „einschalig“ mit Spritzbeton gebaut.

Man denke dabei an die Straßentunnels in Hallstatt, an Stollen im Wasserkraftbau und an Krafthauskavernen. Der Mt Lebanon Tunnel in Pittsburgh, USA, 2 Tunnelröhren mit je 755 m Länge wurde 1982 in einschaliger Bauweise fertiggestellt.

In all diesen Fällen handelt es sich meist um zwei- oder dreilagige Spritzbetonschalen, wobei die einzelnen Lagen zu verschiedenen, oftmals auch mehrere Wochen oder Monate auseinanderliegenden Zeitpunkten, aufgebracht wurden. Ein ausreichender Verbund zwischen den einzelnen Lagen ist möglich, damit das Zusammenwirken dieser Lagen bei Auftreten von Schubbeanspruchung infolge Biegemomenten gewährleistet ist.

Auch ohne Schubverbund ist das Zusammenwirken zweier Spritzbetonschalen in der Form möglich, wie dies zwischen einer Spritzbetonschale und einer Betoninnenschale mit zwischenliegender Isolierung der Fall ist.

Eine derartige Lösung wurde 1984 für eine Weichenstrecke der Wheaton Station der U-Bahn in Washington D. C. gewählt.

Alle diese Lösungen gehen davon aus, daß die äußere, erste Spritzbetonlage ihre Tragfähigkeit erhält, nicht verrottet und damit auf Dauer als Teil des Tunnelausbaues zur Verfügung steht. Es besteht auch kein Grund zur Annahme, daß die erste Spritzbetonlage oder der Spritzbeton überhaupt seine Tragfähigkeit durch Verrottung verlieren könnte, es sei denn, er ist betonaggressiven Einflüssen ausgesetzt.

Selbst wenn die äußere Spritzbetonschale solchen Einflüssen ausgesetzt ist, erfüllt sie die Aufgabe eines primären Ausbaues, mit dem die Spannungumlagerungsvorgänge weitgehend abgeschlossen wurden und folglich eine innere Schale jedweder Bauart weitgehend durch Normalkräfte und nur sehr untergeordnet durch Biegemomente beansprucht wird.

In diesem Zusammenhang ist die vielfach immer noch vertretene Auffassung falsch, nach der der Ausbau eines Tunnels mit einer Außenschale aus Spritzbeton ein temporärer Ausbau sei.

Insbesondere mit den jetzt zur Verfügung stehenden hochwertigen Spritzbetonen, die auch im Tunnelbetrieb mit zufriedenstellend gleichmäßig hoher Qualität herstellbar sind, wäre es nicht vertretbar, den primären Ausbau nicht als Teil des Gesamtausbaues zu sehen und in den tunnelstatischen Berechnungen auch so eingehen zu lassen.

## 2. Statisches Konzept

Die Besonderheit eines Tunnelausbaues aus Spritzbeton besteht darin, daß bereits dem jungen, im Erhärtungsprozess

befindlichen Beton Verformungen aufgezwungen werden. Dieser Spritzbeton entwickelt erst mit der Zeit seine Festigkeits- und Verformungseigenschaften und zeichnet sich, wie aus **Bild 1** ersichtlich, durch ein ganz besonders ausgeprägtes Kriechverhalten aus. Auch aus **Bild 2** sieht man, daß bei konstant aufgezwungenen Dehnungsraten ein ausgeprägt nicht lineares Spannungs-Dehnungsverhalten zu beobachten ist.

Schließlich zeigt **Bild 3** wie bei konstant gehaltenen Stauungen früher aufgebaute Spannungen wieder abnehmen. Dieser Umstand läßt darauf schließen, daß Sicherheiten in der Spritzbetonschale nach Erreichen eines neuen Gleichgewichtszustandes wieder zunehmen, sofern nicht schon früher durch einen zu hohen Auslastungsgrad des Betons bereits Schädigungen eingetreten sind.

In tunnelstatischen Berechnungen wird dem besonderen Verhalten des Spritzbetons meist dadurch Rechnung getragen, daß ein verminderter E-Modul angesetzt wird und mit diesem Wert so vorgegangen wird, als ob sich Spritzbeton weiterhin elastisch verhalten würde [1]. Diese Vorgangsweise ist als unbefriedigend anzusehen. Die besonderen Verhaltensweisen des jungen Spritzbetons lassen sich gut mit der Fließbratenmethode in folgender Form beschreiben. [2]

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 + \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{E_{(t)}} + \sigma_2 \cdot \Delta C_{(t)} \cdot e^{k\sigma_2} + \Delta\varepsilon_d + \Delta\varepsilon_{sh} + \Delta\varepsilon_t$$

$\varepsilon_{1,2}$  = Dehnung am Ende von Intervall 1 und 2

$\sigma_{1,2}$  = Spannung am Ende von Intervall 1 und 2

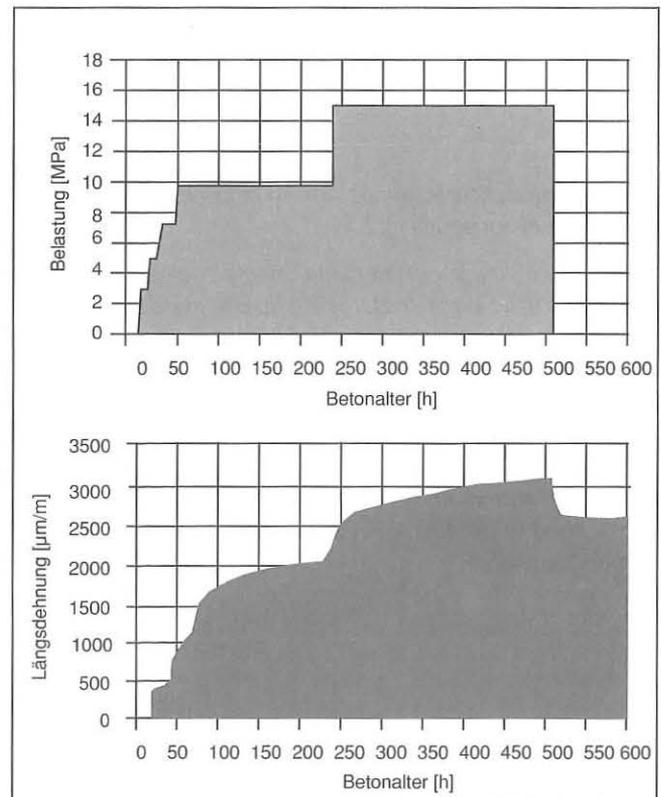


Bild 1: Einachsialer Druckversuch an jungem Spritzbeton

- $E_{(t)}$  = E-Modul nach t Tagen
- $\Delta C$  = Änderung der spezifischen Fließdehnung nach Tagen
- $\epsilon_d$  = Umkehrbare Kriechverformung bzw. verzögert-elastische Dehnung
- $\epsilon_{sh}$  = Schwinddehnung
- $\epsilon_t$  = Temperaturdehnung
- k = Faktor für die überproportionale Spannungsabhängigkeit der Fließdehnung

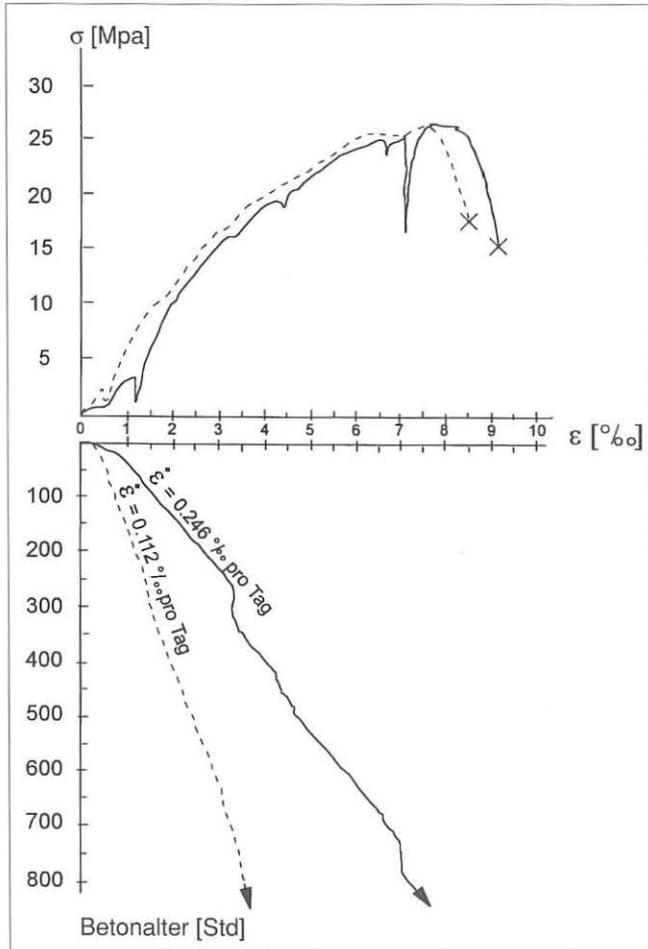


Bild 2: Spannungs-Dehnungskurven bei konstanten Stauchungsraten

Aldrian hat diese Beziehung noch verbessert [3], womit allerdings auch zusätzliche Erschwernisse bei der Ermittlung von zusätzlichen Parametern aus Langzeitversuchen einhergehen.

Zwischen Laborversuchen an einachsigen Druckversuchen und der Nachrechnung dieser Versuche nach der Fließratenmethode kann nach Bild 4 gute Übereinstimmung hergestellt werden. Wenn man nun den tatsächlichen Arbeitsablauf berücksichtigt, bei dem die erste Spritzbetonschale im Zuge des Vortriebes aufgebracht wird und die innere Spritzbetonschale einige Wochen oder Monate später folgt, ergibt sich die Frage, inwieweit es sich dabei auch bei Vorhandensein einer Schubverzahnung zwischen den Spritzbetonschalen um eine einschalige Bauweise handelt. Es können für die einzelnen Schalen auch unterschiedliche Spritzbetonqualitäten, entsprechend der verschiedenen, an sie gestellten Anforderungen verwendet werden.

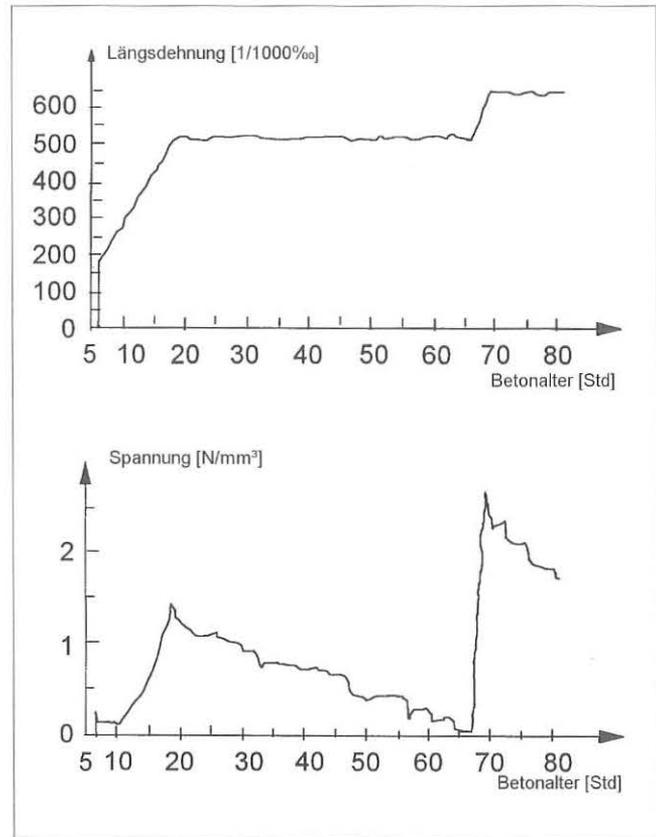


Bild 3: Spannungsabbau durch Kriechen in jungem Spritzbeton

So werden an die innere Spritzbetonlage erhöhte Anforderungen an die Wasserundurchlässigkeit zu stellen sein, während die rasche Festigkeitsentwicklung von untergeordneter Bedeutung ist.

Damit wird klar, daß es sich bei der beschriebenen Vorgangsweise eigentlich nicht um eine einschalige Bauweise handelt. Es handelt sich vielmehr um eine zweischalige Bauweise ohne wesentliche Unterscheidungsmerkmale etwa zu einer Spritzbetonaußenschale und einem später eingebrachten Innenbetonring ohne zwischenliegende Isolierung.

### 3. Beispiel

Beim folgenden Rechenbeispiel handelt es sich um einen kreisrunden Tunnelquerschnitt mit 10 m Durchmesser und 500 m Überlagerung.

Die numerische Berücksichtigung des nichtlinearen Materialverhaltens von Spritzbeton erfolgte unter Verwendung der Fließratenmethode nach Schubert [2]. Die Implementierung dieses Verfahrens in ABAQUS ist in den Diplomarbeiten von Mosser und Pichler detailliert beschrieben. [4] [5]

Die numerische Simulation des Gebirgsverhaltens erfolgt unter Verwendung eines zeitabhängigen Materialgesetzes für das Gebirge. Dafür wird ein standardgemäß in ABAQUS implementierter Zeitverfestigungsansatz verwendet.

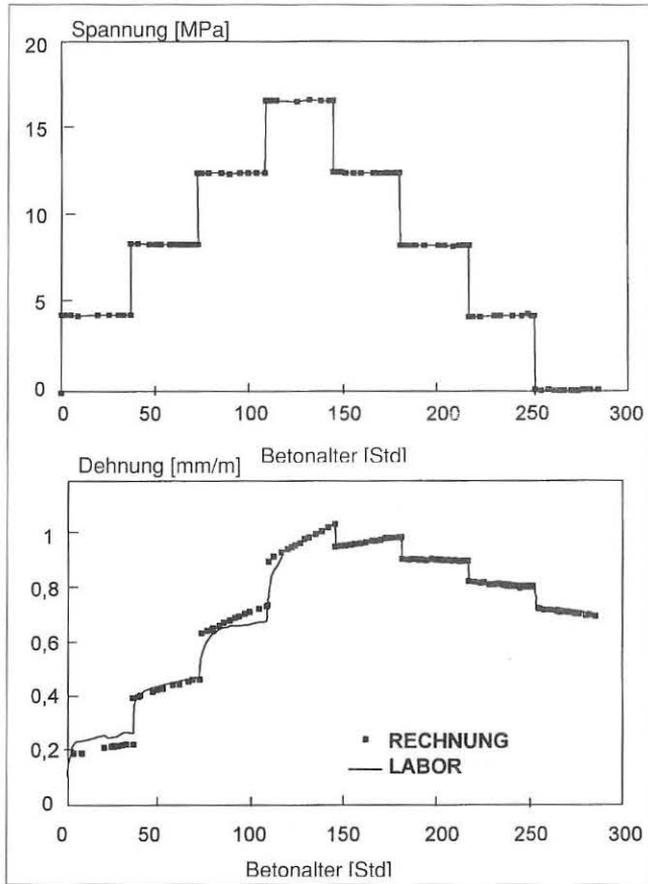


Bild 4: Kriechsimulation an jungem Spritzbeton

Dem vorliegenden Fall liegt die Annahme zugrunde, daß nach etwa 200 Tagen die Verschiebungsgeschwindigkeiten auf etwa 0.1 mm/Monat abgeklungen sind. Das zeitunabhängige Materialverhalten des Gebirges wird als ideal-elastoplastisch unter Verwendung der Fließfunktion nach Drucker/Prager angenommen.

Die innere Spritzbetonlage wird 10 Tage nach der äußeren Spritzbetonlage aufgebracht. Die Ergebnisse der Berechnung sind in **Bild 5** dargestellt. Daraus geht hervor, daß der Biegemomentenanteil in jeder Bauphase äußerst gering ist. Diese alte Erfahrung erlaubt für viele Anwendungsfälle die Bemessung des Spritzbetons nur auf Normalkraft und die Vernachlässigung der Biegemomente. Weiters fällt auf, daß die Biegeanteile mit der Zeit geringer werden und daß in den höher beanspruchten Bereichen die Gesamtbeanspruchung des Spritzbetons infolge Kriechens auch geringer wird. Teile der Beanspruchung des Ausbaues werden in das Gebirge zurückverlagert. Diese Beobachtung wurde schon 1988 beim Bau des Langener Tunnels gemacht und mit in situ Messungen bestätigt. [6]

4. Ausblick

Der Ausbau von Tunnelbauwerken unter Einsparung einer Pumpbeton-Innenschale ist wirtschaftlich attraktiv, weil die innere Spritzbetonschale wegen der ohnehin meist nur geringen Beanspruchung meist relativ dünn ausgeführt werden kann.

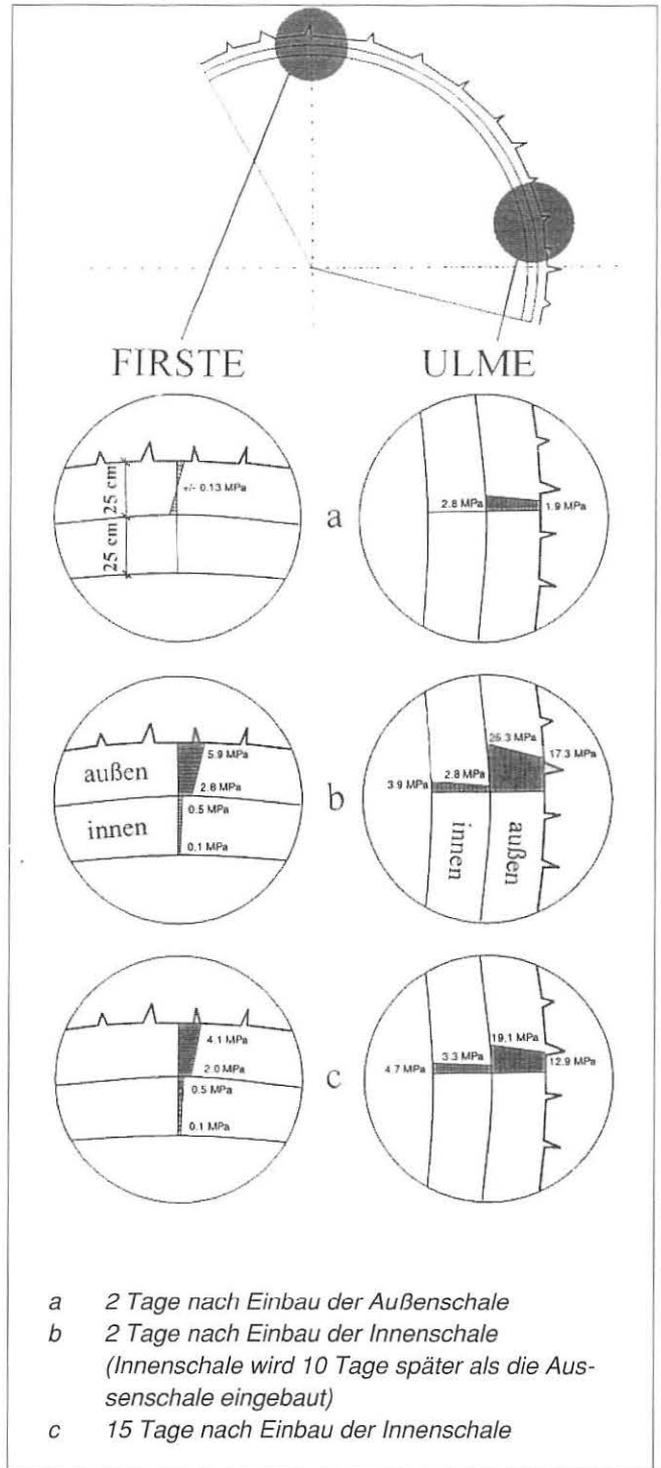


Bild 5: Spannungen im Spritzbeton

Erhöhte Anforderungen sind an die Wasserdichtigkeit, Oberflächenbeschaffenheit etc. zu stellen, will man eine ähnlich günstige Wartungsfreundlichkeit wie für Tunnels mit konventioneller Innenschale und Isolierung erreichen.

5. Literaturverzeichnis

[1] Pöttler, R.: Time dependent rock-shotcrete interaction, Computers and Geotechnics 9, 1990, S. 149-169.

- [2] **Schubert:**  
Beitrag zum rheologischen Verhalten von Spritzbeton, Felsbau 6, 1988, Nr. 3.
- [3] **Aldrian, W.:**  
Beitrag zum Materialverhalten von früh belastetem Spritzbeton, Dissertation, Montanuniversität Leoben, 1991.
- [4] **Mosser, A.:**  
Numerische Implementierung eines zeitabhängigen Materialgesetzes für jungen Spritzbeton in Abaqus, Diplomarbeit, Montanuniversität Leoben, 1993.
- [5] **Pichler, P.:**  
Untersuchungen zum Materialverhalten und Überprüfung von Rechenmodellen für die Simulation des Spritzbetons in Finite-Elemente-Berechnungen, Diplomarbeit, Montanuniversität Leoben, 1994.
- [6] **Golser, J. et al.:**  
Kontrolle der Spritzbetonbeanspruchung im Tunnelbau BHM 135, 1990, Heft 10.

