

---

# Ein Beitrag zur Simulation von Spritzbetontunnelschalen

---

## A CONTRIBUTION TO THE NUMERICAL MODELLING OF SPRAYED CONCRETE LINED TUNNELS

**ALUN THOMAS, DAVID B. POWELL, CHRIS CLAYTON**

Bei der Planung von Tunnels mit einer Spritzbetonauskleidung müssen Bauingenieure nicht nur die Probleme der Simulation des Bodens, sondern auch die der Simulation des komplexen Auskleidungsmaterials und die der Baumethode (z.B. die Abbaufolge) berücksichtigen.

Gegenwärtige empirische, "analytische" und numerische Planungsmethoden machen erhebliche Vereinfachungen in Bezug auf das Materialverhalten von Spritzbeton. Die Auswirkungen von nichtlinearem Materialverhalten, Kriechen und Baudefekten werden selten direkt berücksichtigt, obwohl die Untersuchungen im Labor und auf der Baustelle gezeigt haben, dass die endgültige Spannungsverteilung in der Tunnelauskleidung dadurch stark beeinflusst werden kann. Diese Auswirkungen wurden bisher nicht völlig quantifiziert und deshalb ist es noch unklar, ob sie einen negativen oder positiven Einfluss auf Sicherheit und Kosten haben.

Nach einem Rückblick auf unterschiedliche Planungsmethoden wird hier die Anwendung von verschiedenen Stoffmodellen für Spritzbeton bei der numerischen Simulationen von Tunnels diskutiert. Dieses Thema wurde mittels des Finite-Differenzen Programms FLAC 3D an der Universität von Southampton untersucht. Die Ergebnisse werden mit Messungen des Heathrow Express Projekts in London verglichen.

*During the design of sprayed concrete lined tunnels, engineers must consider not only how to model the ground but also how to treat the complex lining material and the construction method (eg: the construction sequence).*

*Current empirical, 'closed-form' analytical and numerical design methods make significant simplifications with respect to the material behaviour of the sprayed concrete. The effects of non-linear material behaviour, creep and construction defects are rarely incorporated into design analyses directly. Evidence from laboratory tests and construction sites suggests that such effects have a large influence on the final stress distribution in the lining. To date these effects have not been fully quantified and so it remains unclear how they influence safety and costs.*

*After a review of current design methods, the application of different constitutive models for sprayed concrete in numerical modelling will be discussed. This subject has been investigated using the Finite Difference program FLAC 3D at the University of Southampton. The results are compared with insitu measurements from the Heathrow Express project in London.*

## 1. Einleitung

Man könnte sagen, dass eine Spritzbetonauskleidung mehr Freiheit in der Wahl von Geometrie und Flexibilität als die traditionelle Tübbingsauskleidung bietet. Deswegen ist es besonders angemessen, sie für komplizierte Tunnleinrichtungen, wie z.B. U-Bahnstationen einzusetzen. Der Preis für diese große Freiheit ist ein hochentwickelter Entwurf und die intensivere Bauüberwachung im Vergleich zu traditionellen Baumethoden. Der Grund dafür ist, dass die Spritzbetonschale sofort belastet wird, nachdem der Spritzbeton aufgetragen ist. Der Bedarf an umfassenden Messsystemen und intensiver Bauüberwachungen ist schon dokumentiert. Wegen des hohen Risikos im Tunnelbau verlangen Auftraggeber und auch Versicherungsfirmer nicht nur ein umfangreiches Sicherheitsmanagement während der Bauausführung sondern auch eine zuverlässige Risikoabschätzung während der Planungsphase.

In diesem Beitrag werden zuerst das Materialverhalten von Spritzbeton und die üblichen Entwurfsmethoden kurz beschrieben. Die Rolle von numerischen Simulationen wird diskutiert. Am Schluss werden neuere Forschungsergebnisse über die numerische Simulation von Spritzbeton präsentiert. Die an der Universität Southampton durchgeführten Untersuchungen beschäftigten sich mit der Simulation von zwei Fallbeispielen. Das erste ist eine Laborprüfung eines Spritzbetonringes als Teil eines europäischen Forschungsprogramms, des BRITE EURAM - BRE - CT92 - 0231 Forschungsprojektes "New Materials, Design and Construction Techniques for Underground Structures in Soft Rock and Clay Media" - [1 & 2]). Die zweite Untersuchung befasst sich mit dem Bau des Stationstunnels des Heathrow Express Projekts in London.

## 2. Spritzbeton

Eine umfassende Diskussion über Tunnels mit Spritzbetonauskleidung ist woanders zu finden (z.B. (3)). Dieser Abschnitt konzentriert sich auf das Ma-

terialverhalten des Spritzbetons. Das Materialverhalten von Spritzbeton ist im wesentlichen dasselbe wie jenes herkömmlichen Betons. Der Unterschied liegt bei der Verdichtungsmethode sowie im jungen Alter, in dem der mit Erstarrungsbeschleuniger versetzte Beton bereits belastet wird.

### 2.1 Eigenschaften

Die Mischungszusammensetzung wird dafür geplant, dass der Spritzbeton:

- mit dem kleinsten Aufwand gespritzt werden kann,
- einen guten Verbund mit dem Untergrund eingeht und die Beanspruchungen aus der Verformung des Gebirges aufgenommen werden können,
- die projektspezifischen Anforderungen an Festigkeit und Dauerhaftigkeit erreicht werden.

Deswegen weist die Mischung (sowohl für Nassspritzbeton als auch Trockenspritzbeton) im allgemeinen einen größeren Sandanteil, Zementgehalt

Material / Eigenschaft	Hochqualitäts-Nassspritzbeton (7)	In-situ Rüttelbeton (8)
Festigkeitsklasse	B40	B40
Wasser / Zement Wert	0,43	0,40
Zement & Flugasche	430 kg/m <sup>3</sup>	375 kg/m <sup>3</sup>
Beschleuniger	4,0 %	-
Betonverflüssiger	1,6 %	1,5 %
Stabilisator	0,7 %	-
Microsilika	60 kg/m <sup>3</sup>	-
Größtkorn	10 mm	30 mm
Zuschlag < 6 mm	30 - 55 %	32 %

Tab. 1: Typische Mischungszusammensetzung

und Zusatzmittelgehalt bei geringem Größtkorndurchmesser im Vergleich zu Ortbeton auf (Tabelle 1), der W/Z Wert der Mischungen ist oft relativ hoch. Die Folgen sind ein rascher Anstieg der Frühfestigkeit und der anderen technologischen Eigenschaften, eine geringere Endfestigkeit und größere Kriech- und Schwindraten. In Tabelle 2 sind typische Werte dieser Betoneigenschaften angeführt. Darüber wurde ausführlich in der Literatur [4] und [5] berichtet.

Eigenschaft	Hochqualitäts- Naßspritzbeton (7)	In-situ Rüttelbeton (8)
Einachiale Druckfestigkeit nach 1 Tag	20 MPa	ungefähr 6 MPa
Einachiale Druckfestigkeit nach 28 Tagen	59 MPa	44 MPa
Elastizitätsmodul nach 28 Tagen	34 GPa	ungefähr 31 GPa
Schwinden nach 100 Tagen	0,1 - 0,12 %	0,03 - 0,08 %
Spezifisches Kriechen nach 160 Tagen	0,01 - 0,06 % MPa <sup>-1</sup>	0,008 % MPa <sup>-1</sup>
Dichte	2140 - 2235 kg/m <sup>3</sup>	2200 - 2600 kg/m <sup>3</sup>
Gesamt Porosität	15 - 20 %	15 - 19 %
Wasserdurchlässigkeit	10 <sup>-12</sup> bis 10 <sup>-14</sup> m/s	10 <sup>-11</sup> bis 10 <sup>-12</sup> m/s

Tab. 2: Typische Betoneigenschaften

## 2.2 Materialverhalten

Wie herkömmlicher Beton ist auch Spritzbeton durch ein linear-elastisches Materialverhalten bis zu 30 % der einaxialen Festigkeit gekennzeichnet. Ab dieser Grenze wird das Verhalten wegen Mikro-Rissen nichtlinear (Bild 1 - aus dem BRITE-EURAM

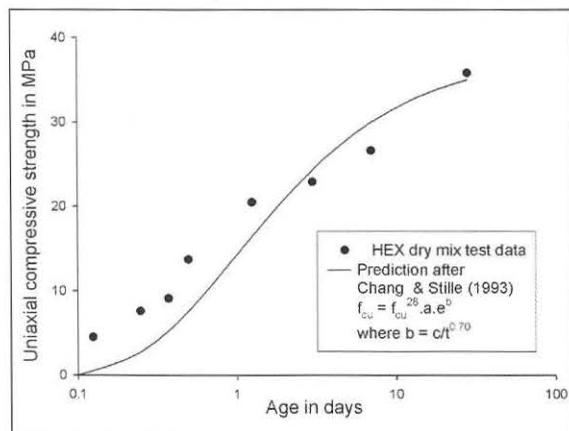


Bild 1: Entwicklung der Druckfestigkeit mit zunehmendem Alter - Daten aus dem Heathrow Express Projekt

Forschungsprojekt). Unter einachsigem Druck besteht das Kriechverhalten jungen Spritzbetons aus einem kurzfristigen Anteil, der rasch einen begrenzten Wert erreicht und aus einem langfristigen Anteil, der eine konstante aber kleine Verformungsrate über längere Zeiträume aufweist. Kriechmaß und Kriechrate steigen mit zunehmendem Druck an (besonders wenn die Spannung größer als 0.5  $\beta$  ist) und nehmen mit zunehmendem Alter ab. Deswegen kann die elastische Dehnung nur einen kleinen Bruchteil der gesamten Dehnung betragen (Bild 2 - nach [6]).

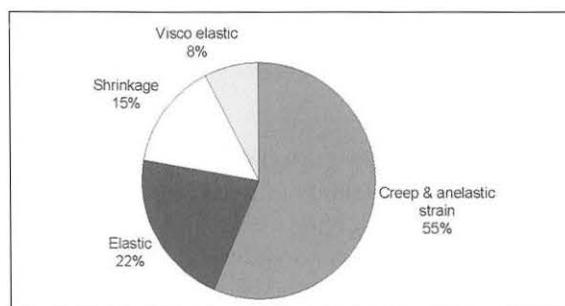


Bild 2: Dehnungsanteile von 240 Stunden altem Stahlfaserspritzbeton [6]

## 2.3 Der Einfluss des Spritzens

Die Größe des Einflusses des Spritzverfahrens hängt davon ab, ob man das Trockenspritzverfahren oder

das Nassspritzverfahren einsetzt. Beim Nassspritzverfahren ist der Spritzvorgang oft halbautomatisch und deswegen hat der Düsenführer weniger Einfluss. Jedoch haben Untersuchungen gezeigt, dass beim Einsatz beider Verfahren Spritzbeton einigermassen anisotropische Eigenschaften aufweist z.B. die Druckfestigkeit rechtwinklig zur Spritzrichtung 10 % bis 25 % höher als die Druckfestigkeit parallel zur Spritzrichtung ist [9 & 10]. Mit Bewehrung aus Fasern oder Stahlmatten steigt die Anisotropie.

## 2.4 Der Einfluss der Abschlagsfolge

Die sogenannte Spritzbetonschale der Tunnelauskleidung besteht in der Praxis wegen der Abschlagsfolge aus vielen Betonringen (nach ÖNORM). Die Auskleidung kann nur als eine Schale wirken, wenn die Fugen gut verbunden werden. Es gibt einen erheblichen Altersunterschied zwischen den Betonringen und daraus resultierende unterschiedliche Schwindverformungen.

## 2.5 Der Einfluß von Imperfektionen

In der Vergangenheit wurde Spritzbeton wegen des Einflusses des Düsenführers, wegen Spritzschatten, mangelhafter Nachbehandlung und weiterer Baustelleneinflüssen für einen Baustoff mit einer niedrigeren Güte als herkömmlicher Rüttelbeton gehalten. Eine typische Standardabweichung für Druckfestigkeit ist 5 MPa (für Naßspritzbeton mit einer durchschnittlichen Enddruckfestigkeit von 25 MPa) [11]. Solche Abweichungen sind hoch im Vergleich zu Rüttelbeton [8]. Jedoch nimmt die Güte des heute hergestellten Spritzbetons immer mehr zu.

## 3. Entwurf für die Spritzbetonbauweise

Dieser Abschnitt bezieht sich auf oberflächennahe Tunnels mit einer Spritzbetonauskleidung im Lockergestein. Klar ist es, dass die Stützfunktion des Spritzbetons im Felstunnelbau, wo instabile Felsblöcke oder höherer tektonischer Gebirgsdruck auftreten [12], sich davon unterscheidet.

### 3.1 Die Berechnungsmethoden

Grundsätzlich gibt es drei unterschiedliche Berechnungsmethoden - empirische, analytische und numerische Methoden. Die Mehrheit der empirischen Methoden, wie z.B. das Q-System, wurde für Tunnels im Fels entwickelt. Das analytische Verfahren nimmt kontinuumsmechanische Modelle wie z.B. Curtis und Muir-Wood und die "Convergence-Confinement" Methode auf. Heutzutage werden Be-

rechnungen mit gebetteten Stabwerken wegen ihrer beschränkten Fähigkeit für die Simulation von "Soil-Structure Interaction (Boden-Ausbau Interaktionen)" nicht so oft verwendet.

Kontinuums-Rechenmodelle sind relativ einfach und liefern Informationen über die Spannungen in der Auskleidung und die Verformungen. Jedoch haben sie einige Beschränkungen: sie sind meistens 2D Modelle in ebenen- oder axialsymmetrischen Schnitten; der Baugrund wird homogen angenommen; Vollausbruch wird angenommen; der Tunnelquerschnitt ist rund. Noch einmal ist die Fähigkeit für eine "Boden-Ausbau Interactions" Simulation beschränkt. Um diese und andere Beschränkungen zu überwinden, muß man numerische Modelle verwenden, z.B. das Finite-Elemente- oder Finite-Differenzen-Verfahren. Die Numerische Simulation ist die einzige Art und Weise, um alle Aspekte von Tunnelproblemen expliziert betrachten zu können.

### 3.2 Numerische Simulation der Spritzbetonbauweise

Trotz ihrer Vorteile sind numerische Rechenmodelle nur eine Annäherung der Wirklichkeit. *Tabelle 3* führt eine Liste der Hauptkategorien von Vereinfachungen und Fehlern mit Beispielen nach [13] an.

Aspekt des Modells	Beispiel
Geometrie	2D statt 3D Modell
Baumethode	Abbaufolge wird nicht simuliert
Konstitutives Modell & Parameterwahl	Annahme, dass das Spritzbetonverhalten linear elastisch ist
Theoretischer Grund der numerischer Lösung	Simulierung des diskontinuierlichen Fels als ein Kontinuum
Resultatauslegung	Biegemomentenkalkül
Menschliche Fehler	Fehler in Eingabedaten

Tab. 3: Ursachen der Fehler in numerischen Simulationen

Es scheint berechtigt zu sagen, dass, wenn ein Teil des "Boden-Ausbau Interactions" Problems unangemessen simuliert wird, die ganze Simulation negativ beeinflusst ist. Viele Forschungsprojekte haben (zumindestens im UK) versucht, bessere Grundmodelle zu entwickeln. Deswegen, zum Beispiel, wird Ton (und auch teilweise andere Baugründe) jetzt für einen tiefenabhängigen, anisotropen, nicht linear elastoplastischen Stoff gehalten [14].

Im Gegensatz dazu werden relativ einfache konstitutive Modelle für die Spritzbetonschale verwendet. Normalerweise wird angenommen, daß der Spritzbeton ein homogener, isotroper, linear elastischer Baustoff ist. Die Entwicklung des E-Moduls mit dem Alter lässt man in einer beschränkten Form einfließen. Jedoch ist es bekannt, daß das Verhalten des Spritzbetons komplizierter ist.

### 3.3 Simulierung der Spritzbetonschale

Zuerst muß man anerkennen, daß die Vereinfachungen in numerischen Simulationen oft wegen der beschränkten Rechnerkapazitäten getroffen und nicht aufgrund mangelhaften Wissens über das Spritzbetonverhalten gemacht wurden.

#### 3.3.1 Konstitutives Gesetz für Spritzbeton

Linear elastische Modelle werden häufig verwendet, weil sie einfach sind und eine kleinere Computerleistung brauchen. Es gibt viele Gleichungen für die Entwicklung des E-Moduls mit dem unterschiedlichen Alter [15]. Im Fall des "Boden Ausbau Interactions" Problems, wird die Tunnelauskleidung mit zunehmender Steifigkeit stärker belastet. Deswegen sind die Normalkräfte und besonders die Biegemomente bei altersabhängigen, linear elastischen Modellen in einer numerischen Simulation kleiner als bei Modellen, welche altersunabhängig sind [16].

Die Methode des Idealen Elazitätsmodul (die sogenannte "Hypothetical Modulus of Elasticity" - HME - Methode) verwendet einen verkleinerten Wert des E-Moduls um Aspekten wie z.B. Kriechen, Schwinden und die dreidimensionale Entspannung des Bodens in Betracht zu ziehen [17]. Diese sehr erfolgreiche "numerische Abkürzung" hat den Nachteil, dass es schwer ist, die HME-Werte im voraus zu ermitteln.

Nichtlinear elastische Modelle werden oft in der Simulierung von Betonkonstruktionen, aber selten für Tunnelauskleidungen verwendet. *Bild 3* zeigt, dass ein modifiziertes Tangenten E-Modul Modell nach Kotsovos & Newman [18] gut mit dem Spritzbetonverhalten übereinstimmt.

Elasto-plastische Modelle sind eine populäre Alternative für die Simulation des nicht linearen Spannungs-Dehnungsverhaltens [19, 20 & 21]. Noch einmal: weil die Tunnelauskleidung eine größere "Nachgiebigkeit" hat, sind die vorhergesagten Normalkräfte einer Simulation und besonders die Biegemomente kleiner. Obwohl es viele Gleichungen

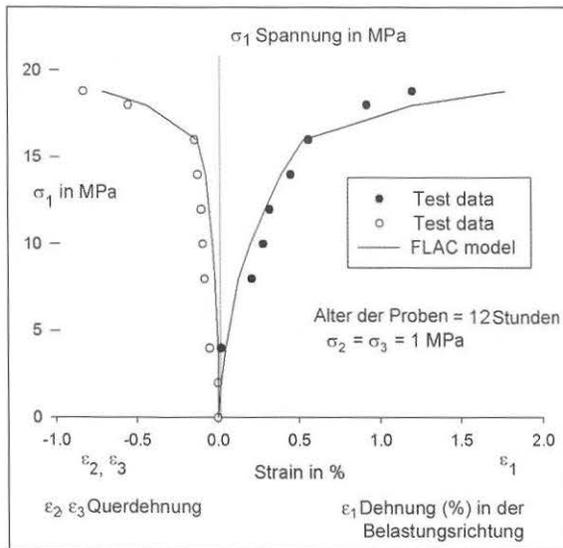


Bild 3: Triaxiale Druckprüfung von Spritzbeton - Daten aus dem Labor und einer numerischen Simulation mit dem nichtlinearen elastischen Modell nach Kotsovos & Newman [18] im FLAC3D

für die Entwicklung der Druckfestigkeit [15] gibt, findet man wenige Informationen über das Verfestigungsverhalten des Spritzbetons. Das Drucker-Prager Bruchkriterium ist häufig verwendet, weil es einfacher ist, aber das Mohr-Coulombsche Bruchkriterium stimmt besser mit den Labordaten für Beton bei niedrigem Druck [22] überein.

Es wurde seit langem angenommen, dass das Kriechen für die Minderung der hohen Spannungen und Biegemomente in Tunnelauskleidungen verantwortlich ist [12, 23, 24]. Viele Modelle sind vorgeschlagen worden, aber das rheologische Kelvin- oder Burgers-Modell passen am besten. Die Auswirkung des Spritzbetonkriechens hängt von dem Bodenverhalten ab. Im allgemeinen kann das Kriechen erhebliche Minderungen der Normalkräfte (20 - 30 %) und der Biegemomente (30 - 60 %) verursachen.

Schwinden und die rasche Entwicklung der Hydrationswärme könnten zu unterschiedlichen Dehnungen in der Auskleidung führen und deswegen Risse verursachen. Solche Risse sind ein großes Problem, wenn der Spritzbeton einen Teil der permanenten Auskleidung bildet. Ausser beim "Thermo-Chemoplastizitätsmodell" [20] und dem "Rate of Flow Modell" [23] werden diese Aspekte normalerweise nicht beachtet. Wenn sie wichtig sind, müsste man auch das nichtlineare Zugspannungs-Verhalten des Spritzbetons und die Auswirkungen der Bewehrung in Betracht ziehen.

Es scheint, dass Imperfektionen und Materialstreuungen, wie z.B. Dicke- und Formabweichungen der Spritzbetonschale, selten berücksichtigt werden. Jedoch ist bekannt, dass das Spritzbetonmischgut veränderlicher als das herkömmliche Betonmischgut sein kann. Baumängel sind oft ein wichtiger Faktor für Tunnelverbrüche. Bei der Planung einer Tübbingauskleidung werden Baumängel, z.B. Formabweichungen, normalerweise berücksichtigt.

### 3.3.2 Verhalten der Spritzbetonschale

Das Verhalten der Spritzbetonschale hängt von ihren Materialeigenschaften und der Grundbeanspruchung ab [24]. Zum Beispiel führt die zusätzliche Verformung der Auskleidung wegen des Plastifizierens oder Kriechens zu zusätzlichen Dehnungen im Baugrund. Die Reaktion des Bodens hängt von seinem konstitutiven Verhalten ab. Daher kann man nicht voraussetzen, daß Kriechen im Spritzbeton immer zu niedrigeren Spannungen führt.

Man muß das Verhalten der ganzen Auskleidung und ihre zeitliche Entwicklung berücksichtigen. Der hohe Ausnutzungsgrad in der Nahe der Ortsbrust kann mit der Zeit wegen der zunehmenden Festigkeitsentwicklung und wegen des Kriechens abnehmen [23 & 24].

## 4. Numerische Simulation eines Tunnelvortriebs

### 4.1 Einleitung und das HEX Projekt

Bei dem Heathrow Express (HEX) Projekt in London, wurden insgesamt mehr als 2000 lfm Tunnels mit der Spritzbetonbauweise gebaut. Nach den Tunnelverbrüchen im 1994 gab es ein umfangreiches Monitoring-Programm. Dadurch bekam man ein ausführliches Bild des Verhaltens oberflächennaher Tunnels mit Spritzbetonauskleidungen im Lockergestein [14 & 25].

Der Bau eines Bahnsteigtunnels im HEX Terminal 4 wird als Fallbeispiel gewählt, um den Einfluß des Spritzbetonstoffgesetzes auf die vorhergesagten Spannungen und Verformungen der Auskleidung zu untersuchen.

### 4.2 Numerische Analysen

Ein numerisches Modell des Tunnels wurde mit verschiedenen konstitutiven Modellen für den Spritzbeton analysiert. Das konstitutive Modell des Baugrunds und die Abschlagslänge wurden ebenfalls variiert. Als Hauptmodell für den Baugrund wurde ein nicht-dränirtes, isotropes, elastisch ver-

festigungsplastisches Modell mit einem Bruchkriterium nach Tresca gewählt. Das Finite-Differenz Programm FLAC3D kam zum Einsatz. Zuerst wurden 2D und 3D Analysen gemacht, um die beste Größe des Netzes und die beste Diskretisierung zu finden. Das 3D-Modell hatte 24.000 Zonen und jede Analyse dauerte zwischen 1,5 bis 3 Tagen, je nach konstitutiven Modell für den Baugrund und den Spritzbeton.

**4.3 Das 3D-Modell**

Zur Simulation wurde ein vereinfachender 3-Stufen Vortrieb verwendet, statt des tatsächlichen 5-Stufen Vortriebschemas (Tabelle 4). Bild 4 zeigt das Modellnetz. Der Tunnel liegt im Londoner Ton. Die

Stufe	Numerisches Modell	HEX Tunnel
1	Kalotte & Strosse	Kalotte
2	Kalotte & Strosse	Strosse
3	Sohle - 2 Abschlüge	Kalotte
4		Strosse
5		Sohle - 2 Abschlüge

Tab. 4: Abbaufolge für den Bahnsteigtunnel

überliegende, 2 Meter dicke, Kiesschicht wurde als Druck auf der Oberfläche des Netzes simuliert. Der Außendurchmesser des Tunnels betrug 8,30 m. Die Eigenschaften des Baugrunds und des Spritzbetonmodells sind in Tabelle 5 angeführt. Der Seitendruckbeiwert war 1,50.

**4.4 Die Spritzbetonauskleidung**

Die HEX Tunnelauskleidung hatte eine Dicke von 300 mm und wurde mit zwei Stahlmatten (8/8 mm, 150 x 150 mm) bewehrt. Wenn möglich wurden die Modellparametern nach Projektsdaten gewählt. Jedoch gab es regelmäßige Prüfungen nur für

Druckfestigkeit und den Elastizitätsmodul. Die anderen Parameter wurden nach einem Literaturüberblick gewählt.

**5. Resultate**

Einige Resultate werden hier präsentiert. Obwohl diese Resultate sich auf den First beziehen, sind sie dennoch typisch für die Auskleidung im Ganzen.

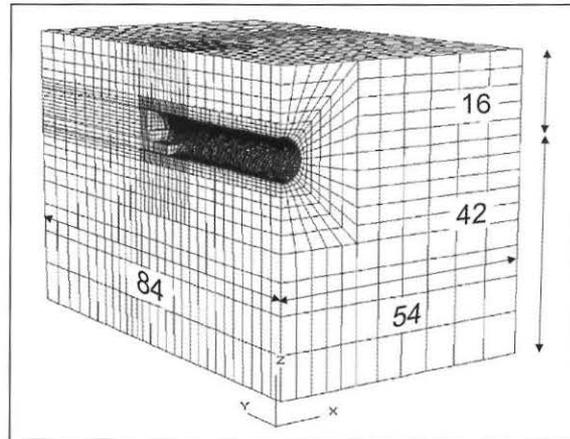


Bild 4: FLAC3D Finite-Differenz Netz für die Simulation der HEX Tunnel

Bild 5 zeigt die Radialspannungen des Bodens auf die Spritzbetonschale. Obwohl die vorhergesagten Radialspannungen (mittlerer Wert: 55 % der Primärspannung) das zweifache der HEX In-situ-Messungen betragen, ist das Muster des Graphen ungefähr dasselbe. Die hohen Radialspannungen am First existieren möglicherweise wegen der Simulation des Kieses als Druckspannung auf die Oberfläche des Netzes.

Bild 6 zeigt die Normalkraft in der Firste in Relation zur zunehmenden Entfernung von der Ortsbrust. Das angenommene Materialgesetz für den Spritzbeton hat nur mäßigen Einfluß auf die Schnittkräfte.

Kode	Beschreibung	Parameter
-	London Ton	
-	Isotropes Modell mit Verfestigungsplastizität (nicht-dräniert)	$C_u = 0,67 \cdot (50 + 8z)$ ; $E_u = 1500 \cdot C_u$ ; Mohr-Coulomb Modell; Reibungswinkel = null
-	Spritzbeton	
E-	Konstanter Elastizitätsmodul	$E = 27 \text{ GPa}$ , $\nu = 0,2$
Et	Zeitabhängiger Elastizitätsmodul	$E_{28 \text{ Tage}} = 27 \text{ GPa}$ , $\nu = 0,2$ , Et nach Sezaki et al. 1992 (26)
HME	Hypothetischer Elastizitätsmodul	Alter < 60 Std: $E = 7,5 \text{ GPa}$ , $\beta = 5 \text{ MPa}$ Alter > 60 Std: $E = 15 \text{ GPa}$ , $\beta = 16,75 \text{ MPa}$
MC SS	Modell mit zeitabhängiger Verfestigungsplastizität	Druckfestigkeit gemäß [15]
VE	Modell mit Visko-Elastizität	Ein zeitabhängiges rheologisches (Kelvin) Modell

Tab. 5: Konstitutive Modelle für die FLAC3D Analysen

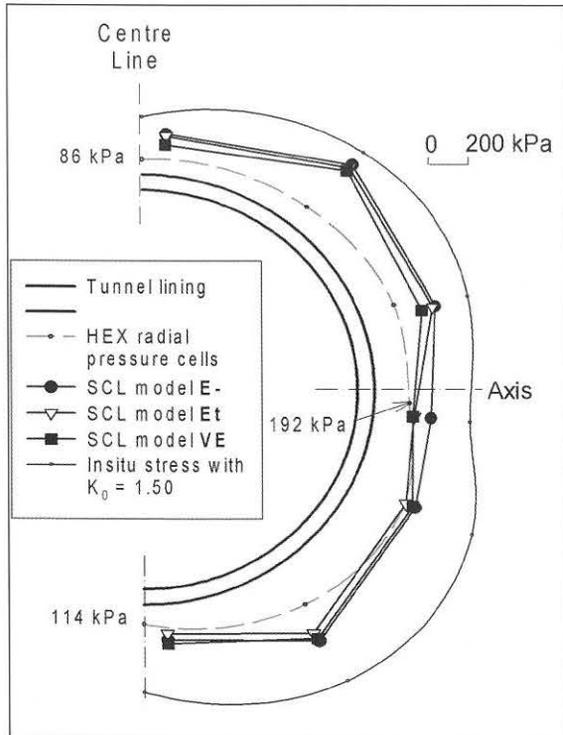


Bild 5: Radialspannungen des Bodens auf die Spritzbetonschale

Die Resultate von Druckmessdosen sind erheblich niedriger als die vorhergesagten Kräfte aus dem numerischen Modell. Probleme mit Druckmessdosen sind jedoch bekannt [23 & 24].

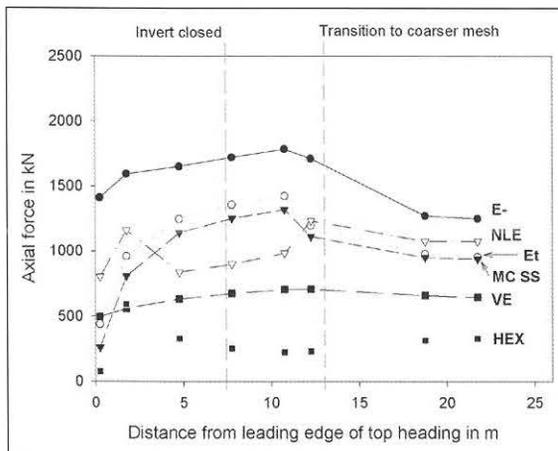


Bild 6: Normalkraft mit zunehmender Entfernung von der Ortsbrust in der Kalotte

Bild 7 zeigt, daß das Materialgesetz einen größeren Einfluss auf die vorhergesagten Biegemomente hat als auf die Normalkräfte. Wenn diese Resultate stimmen - das heißt die Biegemomente ganz klein sind - braucht man weniger oder keine Stahlbewehrung. Sollte keine Stahlmattenbewehrung in der Spritzbetonschale nötig sein, wird dadurch eine der

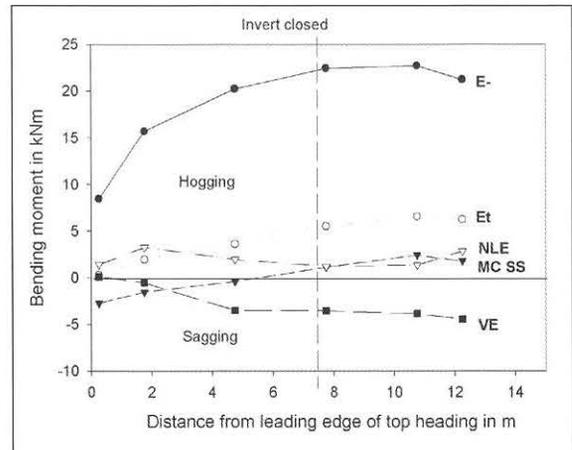


Bild 7: Biegemomente mit zunehmender Entfernung von der Ortsbrust in der Kalotte

größten Sorgen bezüglich der Dauerhaftigkeit beseitigt.

Der Ausnutzungsgrad nimmt mit der Entfernung von der Ortsbrust ab. Wie in anderen Untersuchungen [24] beträgt der Ausnutzungsgrad hier zunächst beinahe 100 %, aber liegt später zwischen 25 und 35 %.

Einer der Gründe für diese Forschung war die Sorge, dass normale Rechenmodelle und In-situ-Messungen kein Gesamtbild vermitteln können. 3D numerische Modelle können uns mehr Informationen über das Verhalten der Spritzbetonschale geben. Zum Beispiel zeigt Bild 8, dass die Spannung nicht bei jedem Abschlag konstant ist. Die Spannungen sind in dem Teil höher, der sich näher bei der Ortsbrust befindet. Zudem erhält man aus diesen mehr komplizierten Modellen die volle Spannungs- und Verformungsgeschichte (von der Ortsbrust bis zum endgültigen Zustand).

## 6. Zusammenfassung

Der Wichtigkeit einer genaueren Simulation des Spritzbetonsverhaltens ist man sich seit Jahren bewusst [27]. Dennoch hat man keine zuverlässigen Modelle entwickelt, da das Problem zu kompliziert ist.

Auf Grunde ihrer Vereinfachungen sind Kontinuumsrechenmodelle unangebracht. Jedoch sind sie sehr nützlich in der Vorplanungsphase und für unabhängige Kontrollen der numerischen Simulation.

Die Resultate der numerischen Simulation der vorliegenden Untersuchung haben die Meinung gestützt, dass das ausgewählte konstitutive Modell einen großen Einfluss auf den angenommenen

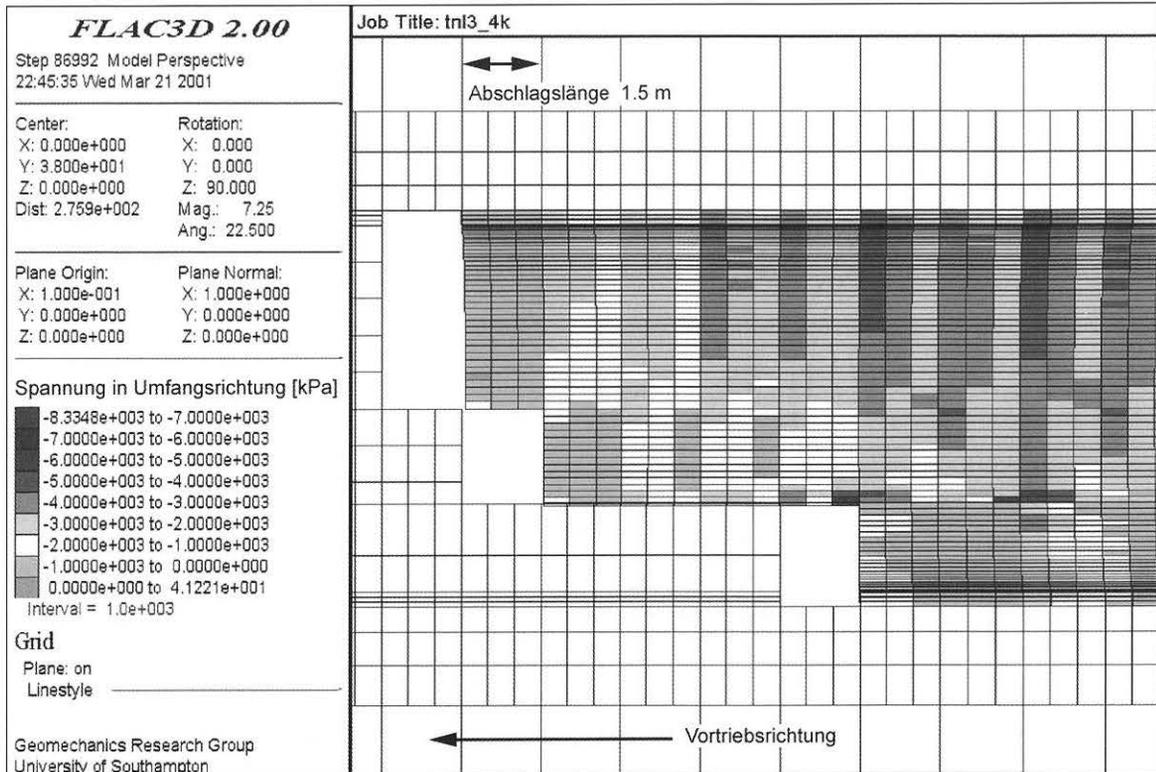


Bild 8: Spannung in Umfangsrichtung in der Tunnelauskleidung

Spannungszustand in der Tunnelauskleidung ausübt. Wenn man ein nichtlineares- oder ein Kriech-Stoffgesetz für Spritzbeton verwendet, sind die vorhergesagten Normalkräfte und besonders die Biegemomente kleiner.

Mit dem immer wachsenden Wissen über das Spritzbetonverhalten und zunehmenden Rechnerkapazitäten werden Ingenieure bald Spritzbetonschalen mit der gleichen Sicherheit planen können, wie sie heute Tübbingsauskleidungen planen.

## 7. Literatur

- [1] Thomas, A.H.; Clayton, C.R.I.; Norris, P.: The role of constitutive models in the analysis of shotcrete-based support systems. Engineering Developments in Shotcrete, Hobart 2000.
- [2] Norris, P.; Powell, D.: Towards quantification of the engineering properties of steel fibre reinforced sprayed concrete. 3<sup>rd</sup> Int. Symp. on Sprayed Concrete, Gol, Norway, 1999.
- [3] ICE: Sprayed Concrete Linings (NATM) for tunnels in soft ground. Institution of Civil Engineers design and practice guides, Thomas Telford, London, 1996.
- [4] Malmberg, B.: Shotcrete for Rock Support: a Summary Report on the State of the Art in 15 Countries. ITA report: Tunnelling and Underground Space Technology, 1993, Vol 8, No 4: 441 - 270.
- [5] Maidl, B.: Handbuch für Spritzbeton. Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 1992.
- [6] Ding, Y.: Technologische Eigenschaften von jungem Stahlfaserbeton und Stahlfaserspritzbeton. PhD Thesis, University of Innsbruck, 1998.
- [7] Darby, A.; Leggett, M.: Use of shotcrete as the permanent lining of tunnels in soft ground. Mott MacDonald Ltd internal project report, 1997.
- [8] Neville, A.M.: Properties of concrete. Addison Wesley Longman Ltd, Harlow, 1995.
- [9] Aldrian, W.: Beitrag zum Materialverhalten von früh belasteten Spritzbetonschalen.

- tetem Spritzbeton. Diploma Thesis, University of Leoben, 1991.
- [10] **Huber, H.G.:**  
Untersuchungen zum Verformungsverhalten von jungem Spritzbeton im Tunnelbau. Diploma Thesis, University of Innsbruck, 1991.
- [11] **Bonapace, P.:**  
Evaluation of stress measurements in NATM tunnels at the Jubilee Line Extension Project. Tunnels for People, eds Hinkel, Golser & Schubert, pp 325 - 330, 1997.
- [12] **Rabcewicz, L. v.:**  
Stability of tunnels under rock load Part 2. Water Power, 1969, July: 266 - 273.
- [13] **Woods, R.I.; Clayton, C.R.I.:**  
The application of the CRISP finite element program to practical retaining wall problems. Retaining structures. Thomas Telford, London, pp 102 - 111, 1993.
- [14] **Van der Berg, J.P.:**  
Measurement and prediction of ground movements around three NATM tunnels. PhD Thesis, University of Surrey, 1999.
- [15] **Chang, Y.; Stille, H.:**  
Influence of early-age properties of shotcrete on tunnel construction sequences. Shotcrete for Underground Support VI, pp 110 - 117, 1993.
- [16] **Soliman, E.; Duddeck, H.; Ahrens, H.:**  
Effects of development of stiffness on stresses and displacements of single and double tunnels. Tunnelling and Ground Conditions, Abdel Salam (ed.) :549 - 556, 1994.
- [17] **Pöttler, R.:**  
Evaluating the stresses acting on the shotcrete in rock cavity constructions with the Hypothetical Modulus of Elasticity. Felsbau, 1985, Vol 3, No 3: 136 - 139.
- [18] **Brite Euram:**  
Collapse Limit-State Model - Sub Task C2. Imperial College, London, 1997.
- [19] **Meschke, G.:**  
Elasto-viskoplastische Stoffmodelle für numerische Simulationen mittels der Methode der Finiten Elemente. Habilitation Thesis, Vienna University of Technology, 1996.
- [20] **Hellmich, C.; Ulm, F.-J.; Mang, H.:**  
Multisurface chemoplasticity. I: Material model for shotcrete. Journal of Engineering Mechanics, 1999, Vol. 125, No. 6, pp 702 - 713.
- [21] **Hafez, N. M.:**  
Post-failure modelling of three-dimensional shotcrete lining for tunnelling. PhD Thesis, University of Innsbruck, 1995.
- [22] **Chen, W.F.:**  
Plasticity in reinforced concrete. New York: McGraw-Hill, 1982.
- [23] **Golser, J.; Schubert, P.; Rabensteiner, K.:**  
A new concept for evaluation of loading in shotcrete linings. Proc. Int. Congress on Progress and Innovation in Tunnelling, pp 79 - 85, 1989.
- [24] **Rokahr, R.B.; Zachow, R.:**  
Ein neues Verfahren zur täglichen Kontrolle der Auslastung einer Spritzbetonschale. Felsbau, 1997, Vol. 15, No. 6, pp 430 - 434.
- [25] **Powell, D.B.; Sigl, O.; Beveridge, J.P.:**  
Heathrow Express - design and performance of platform tunnels at Terminal 4. Tunnelling '97, IMMIG, pp 565 -593, 1997.
- [26] **Sezaki, M.; Aydan, O.; Kawata, T.; Swoboda, G.; Moussa, A.:**  
Numerical modelling for the representation of shotcrete hardening and face advance of tunnels excavated by bench excavation method. Numerical models in geomechanics (ed.s Pande & Pietruszczak), pp 707 - 716, 1992.
- [27] **Rokahr, R.B.; Lux, K.H.:**  
Einfluss des rheologischen Verhaltens des Spritzbetons auf den Ausbauwiderstand. Felsbau, 1987, Vol 5, Issue 1, pp 11 - 18.