

---

# INNOVATIVE PERMANENTE TUNNELSCHALEN AUS SPRITZBETON IM LONDONER TON

---

## *INNOVATIVE PERMANENT SHOTCRETE TUNNEL LININGS IN LONDON CLAY*

Colin **Eddie** FREng BSc CEng FICE, Morgan=Est, Rugby, England  
Ing. Christian **Neumann**, Beton- und Monierbau, Innsbruck, Österreich  
DI Dr. Johannes **Jäger**, Beton- und Monierbau, Innsbruck, Österreich

Im Beitrag wird kurz auf die Geschichte von „Permanente Spritzbetonschalen“ im Tunnelbau eingegangen. Für Felstunnel (Beispiele dafür gibt es in Skandinavien) wird der Spritzbeton als permanenter Ausbau schon seit Jahrzehnten eingesetzt. Die Verwendung von Spritzbeton für Tunneln in Lockergestein ist relativ neu. Der in großen Bereichen homogene Londoner Ton bildet einen idealen Baugrund für den Tunnelbauer. Dieser Umstand begünstigte die Entwicklung permanenter Tunnelschalen aus Spritzbeton für hochwertige Infrastruktur-Bauwerke. Beispiele sind die Projekte für den Flughafen Heathrow in London (Baggage Tunnel 1995, Terminal 5 in den Jahren 2001 bis 2006) und die U-Bahn-Station Kings-Cross in London.

Der Beitrag beschreibt anhand von Beispielen der ausgeführten Projekte die innovativen Methoden der Ausführung und die für die mit der permanenten Spritzbetonbauweise zusammenhängenden Themen der Materialtechnologie, Wasserdichtigkeit sowie der statischen Berechnung dieser Schalensysteme. Der Stand der Untersuchungen für zukünftige Entwicklungen von wasserdichten Schalen aus hochfesten, hochduktilen und optional textilbewehrten ECC-Spritzbeton wird im Beitrag diskutiert.

*In this paper a short „History“ of „Permanent Shotcrete Tunnel Linings“ will be described. For tunnels in rock (examples Scandinavia) shotcrete has been used as permanent lining already for decades. Use of shotcrete for tunnels in soft ground is relatively new. Homogenous London clay is an ideal medium for the tunneller and this was the reason for developments of permanent shotcrete-shells for tunnels of high-quality infrastructure. Examples are projects for Heathrow-Airport in London (Baggage Tunnel 1995, Terminal 5 in the years 2001 to 2006) and the London Underground Metro-Station at Kings-Cross.*

*The paper describes the innovative methods of execution and connected technical issues of material-technology, waterproofing and structural analysis of these shell-structures. Actual research for future development of high-strength, high-ductile and watertight shells using ECC-shotcretes with optional textile-reinforcements will be discussed.*

### **1. Geschichtlicher Rückblick auf „Permanente Spritzbetonschalen im Tunnelbau“**

Im Tunnelbau wird die Spritzbetonbauweise zum überwiegenden Teil als vorläufige Sicherung während der Phase des bergmännischen Ausbruches eingesetzt. Leopold Müller-Salzburg [1] spricht in diesem Zusammenhang von „Verbau“ und definiert folgendermaßen: „Bezeichnet man im Tunnelbau als **Verbau** eine vorläufige Sicherung des Hohlraumes und Stützung des Gebirges, so heißt **Ausbau** alles, was dem Bauwerk definitiven Halt gibt, einerlei, welcher Art die dabei verwendeten Mittel sind und ob diese erst zuletzt oder schon im Zuge der provisorischen Sicherung mit eingebracht werden“.

Die Begriffe „Außenschale“ und „Innenschale“ kommen aus der klassischen „Neuen Österreichischen Tunnelbauweise“ (NÖT, Englisch New Austrian Tunneling Method = NATM) und die Möglichkeit der Berücksichtigung von Spritzbeton als (permanenten) Ausbau wurde schon vor über 40 Jahren verwirklicht und Müller schreibt: „Die Außenschale (in gewissen Fällen auch die sie vertretende Ankerung) kann als ein Bestandteil der bleibenden Gesamtkonstruktion betrachtet werden, insofern sie keiner Zerstörung durch Korrosion ausgesetzt oder gegen eine solche geschützt ist“ [1].

Sowohl geometrische, statische, bauphasenbezogene und zeitabhängige Randbedingungen des Spritzbeton-Tunnelbaues führten zu den Begriffen „Einschaliger/Zweischaliger/Mehrschaliger Tunnelausbau“ oder „Temporärer/Permanenter Tunnelausbau“.

Eine zusätzliche Varianz des Schalenaufbaues bildet die Forderung nach Wasserdichtigkeit des Ausbaues. Wasserdichtigkeit ist durch Einbau von Dichtmembranen oder durch Herstellung von wasserdichten Schalen aus Beton, Gussstahlübungen, Stahl oder Kunststoff möglich. Dieser mehrschichtige Aufbau der Schalen ist in seiner statischen Wirkung sehr unterschiedlich, insbesondere bei Einbau von Trennschichten, wie sie zum Beispiel eine Kunststoff-Isolierung mit Drain-Lage (Vlies) darstellt.

Der Ausbau im Tunnelbau ist in der Praxis immer mehrlagig, da aus baubetrieblichen Gründen und aus den unterschiedlichen Anforderungen an den Schalenaufbau (Baubetrieb und Schichtdicke, Dichtungsanforderung, Sichtfläche etc.) ein Einbau des Ausbaues in Spritzbeton in einem Arbeitsvorgang kaum möglich ist. Trotzdem wird der Begriff der „Einschaligen Spritzbetonbauweise“ in der Welt des Tunnelbaues oft verwendet. Es entstehen daraus aber oft Missverständnisse und daher wird im Folgenden der Begriff **„Permanente Tunnelschale aus Spritzbeton“** verwendet.

Permanente Tunnelschalen aus Spritzbeton waren seit Beginn der Spritzbetonbauweise ein „Traum der Spritzbeton-Tunnelbauer“. Vorrangiges Argument war die Wirtschaftlichkeit und daher die Frage: „Warum soll ich auf den Spritzbeton als tragende permanente Schale bei meinem Tunnel verzichten, wenn dieser Spritzbeton eine hohe und dauerhafte Qualität hat? Ich könnte mir viel Geld sparen, wenn ich diese Schale als statisch wirksamen Teil meines Ausbaues berücksichtigen könnte!“

Schon mit Beginn der 1980er-Jahre wurden in der Blütezeit des U-Bahnbaues in Deutschland erste Versuchsstrecken und Forschungsarbeiten durchgeführt. Diese Projekte sind gut dokumentiert [2]. Der Einsatz von permanenten Tunnelschalen aus Spritzbeton war aber auf relativ begrenzte und besondere Einzelmaßnahmen und kleinere Projekte beschränkt. Die historischen Gründe der begrenzten Anwendung von permanenten Tunnelschalen aus Spritzbeton lagen im Wesentlichen an folgenden Punkten:

- Problematik des Einbaues einer permanenten Schale im Zuge des bergmännischen Ausbruchs (Bereich der Ortsbrust, Gebirgs- oder Bodendeformationen, Vibration durch Sprengen, Gebirgswasser, Penetration durch Anker, Beschädigung der Schalen durch Großgerät, Arbeitsfugen zwischen den Teilausbrüchen und Abschlagslängen).
- Problematik der Wasserdichtigkeit der Spritzbetonschalen (Risse, Stahleinbauten und Korrosion, Arbeitsfugen, Abhängigkeit und dadurch Unstetigkeit durch handwerklichen Prozess).

- Problematik beim Spritzen auf Dichtfolien (PVC oder PE Folienisolierung):
  - Wirtschaftlich nur dann, wenn der Aufwand für eine Schalung höher ist als der Mehraufwand, welcher beim Spritzen auf Folie erforderlich ist (räumlich komplexe Geometrie, kurze Tunnels oder relativ kleinere Oberflächen, bei denen sich eine Tunnelschalung nicht rechnet).
  - Hohlraum bergseitig hinter Dichtfolie durch Schutz/Drainage-Vlies und „Durchhängen“ der Folie aufgrund von nicht ausreichender Anzahl von Befestigungspunkten und speziell in der Firste (Bettung der Tunnelschale nicht gewährleistet)
- Problematik der Homogenität, Festigkeit und Dauerhaftigkeit von Spritzbeton im Vergleich zu gegossenem Beton

Durch Entwicklungen der letzten 15 Jahre in den Bereichen der Maschinen- und Materialtechnologie, der Zusatzmittel- und Beschleuniger-Chemie sind die Probleme betreffend Festigkeit und Dauerhaftigkeit des Spritzbetons bereits Geschichte [3]. Die Mechanisierung durch Spritzroboter und die weitgehende Verwendung von Nass-Spritzbeton hat auch die Problematik der Abhängigkeit vom handwerklichen Können vermindert. Es blieben aber „Schwachpunkte“ wie der Einbau einer permanenten Schale im Zuge des bergmännischen Ausbruchs und die Fragen der Wasserdichtigkeit von permanenten Spritzbetonschalen.

## **2. Entwicklungsschritte von Morgan=Est und Beton- und Monierbau für permanente Spritzbeton-Tunnelschalen in der Geologie des Londoner Tones**

### 2.1 Entwicklungsschritt CombiShell

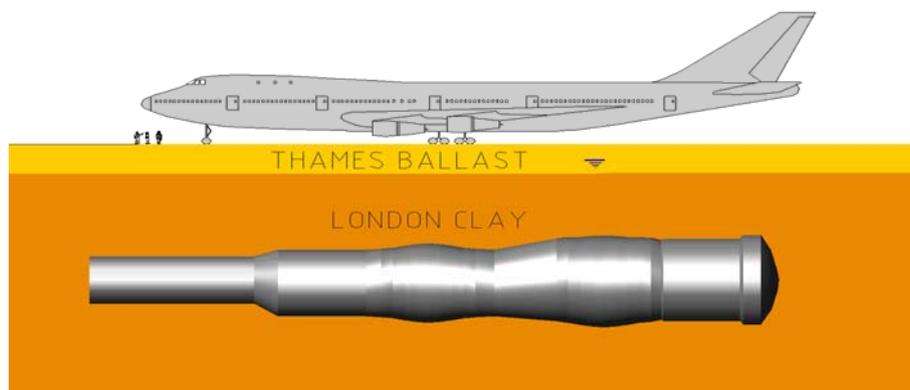
Tunnelbau im Londoner Ton hat eine lange Tradition und viele Entwicklungen aus dem Bereich des mechanischen Tunnelbaues im Lockerboden wurden in England vorangebracht. Der Londoner Ton ist ein ideales Medium für den Tunnelbau, und solange ein „schneller Ringschluss“ und damit ein sofortiger Ausbauwiderstand aufgebracht wird, ist der Ton sowohl mit mechanischen als auch bergmännischen Methoden leicht zu beherrschen.

Durch einen spektakulären Tunnel-Verbruch beim Bau der Heathrow-Extension (HEX) im Jahr 1994 ist die Neue Österreichische Tunnelbaumethode im Londoner Ton unter heftige Kritik gekommen. Die Behörden verordneten in der Folge dieses Unfalls (es waren gottseidank weder Tote noch Verletzte zu beklagen) ein Verbot der Spritzbetonbauweise, solange die Ursachen dieses Ereignisses nicht klar waren und die Methode nachweislich nach den englischen Vorschriften als sicher eingestuft werden konnte [4]. Das war auch der Zeitpunkt an dem die NATM (New Austrian Tunnelling Method) in Großbritannien in „SCL-Method“ umbenannt wurde (SCL steht für „Sprayed Concrete Lining“).

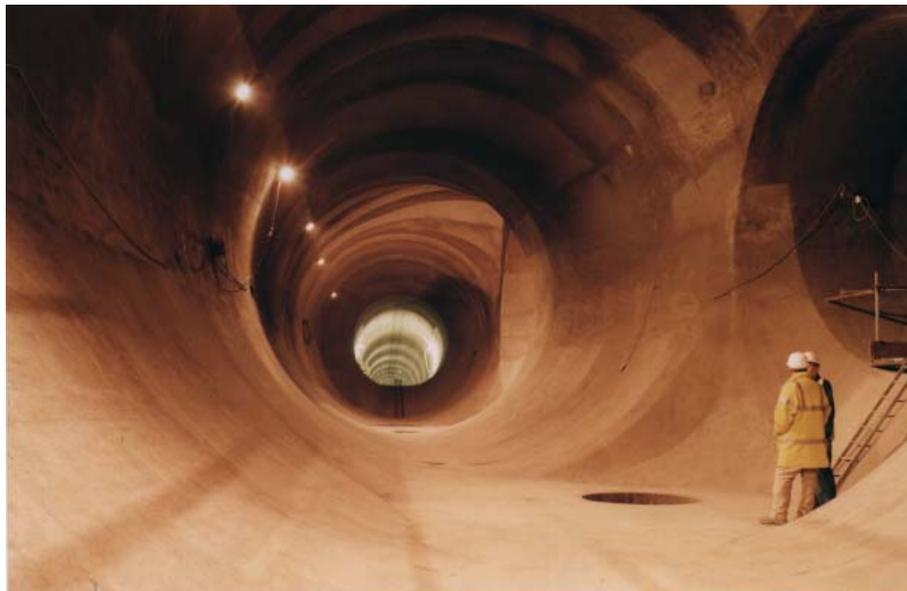
Zeitgleich zum HEX wurde das Projekt „Heathrow Baggage Tunnel“ von Morgan=Est und Beton- und Monierbau gebaut. Es handelte sich hier um einen Sondervorschlag (Bild 1 und Bild 2) für den Bau großer Untertagequerschnitte und Kreuzungsbauwerke eines unterirdischen Paket-Transport-Systems mit permanenter Spritzbeton-Tunnelschale als Combi-Shell [5 und 6].

Aufgrund des Verbruches beim HEX wurde unser Sondervorschlag verständlicherweise „auf Herz und Nieren“ geprüft und zusätzliche Nachweise betreff Referenzen, sicherer Ausführbarkeit, Qualitätskontrolle, und Dauerhaftigkeit wurden eingefordert. Zusammenfassend sind dabei folgende Themenschwerpunkte mit dem Bauherrn und Planer betreffend Sondervorschlag diskutiert und abgeklärt worden:

- Arbeitssicherheit
- Qualität der Spritzbetonschale und Anschlussdetails in Verbindung mit Bewehrungsstahl und Ausbaubögen
- Referenz und Können des eingesetzten Personals, insbesondere der Düsenführer
- Messprogramm (Deformationsmessungen) und „Chain of Command“ (Verantwortungs-Struktur) betreff Planung, Ausführungskontrolle und Messdaten-Interpretation
- Dauerhaftigkeit des Spritzbetons beim Einsatz von Zusatzmitteln/Beschleuniger der neuesten Generation [8 und 9]
- Dreidimensionale FE-Berechnungen für die statischen Nachweise



*Bild 1: Größenverhältnis CombiShell™-Tunnel bis 11 Meter Durchmesser unter Flugzeugstandplatz*

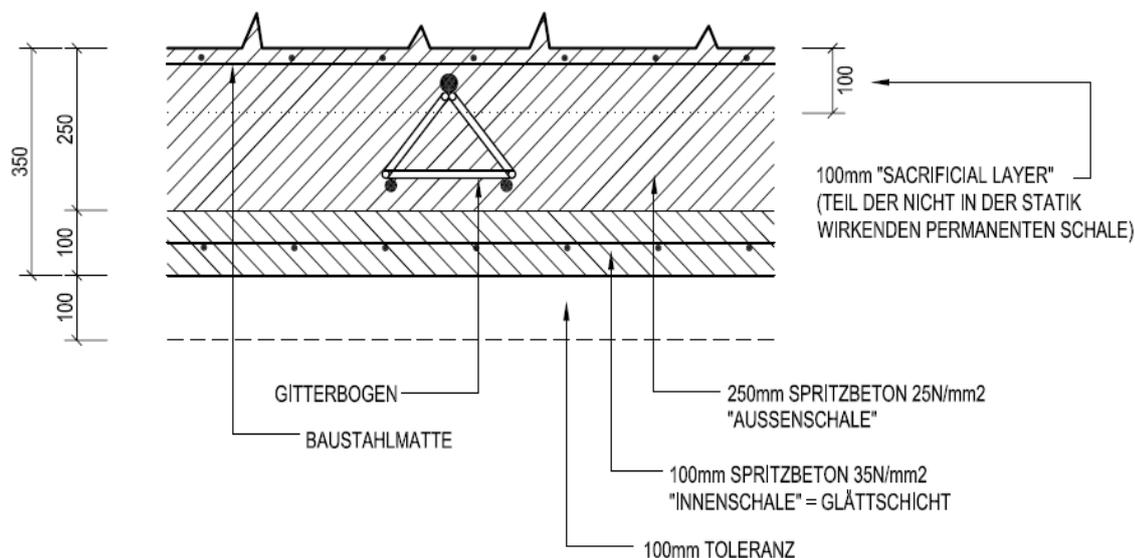


*Bild 2: Fertiggestelltes Kreuzungsbauwerk aus permanentem Spritzbeton*

Der Schalenaufbau der CombiShell wurde, wie im Bild 3 dargestellt, zweiphasig erstellt: Die „Außenschale“ bzw. erste Spritzbetonlage ist 150 bis 300 mm stark, wobei eine 100 mm Dicke der den ausgebrochenen Boden berührenden Schicht, nicht als statisch wirkende permanente Schale berücksichtigt wird.

Die in einer späteren zweiten Phase aufgebrauchte „Innenschale“ bzw. zweite Lage hat eine Dicke von 100 bis 150 mm und wirkt im Verbund mit der ersten Lage. Außerdem hat diese zweite Lage auch die Funktion einer Sichtbetonoberfläche und wird sofort nach dem Spritzvorgang geglättet.

Die Einbeziehung der „Außenschale“ in die statischen Überlegungen des permanenten Bauwerkes ist möglich, da die Verformung beim Ausbruchsvorgang unter Einhaltung gewisser Grundvoraussetzungen, wie schneller Ringschluss und entsprechend dimensionierter Außenschale sehr gering ist und rasch abklingt. Außerdem sind im Regelfall die Grundwasserhältnisse im Londoner Ton im Ausbruchszustand leicht beherrschbar, und eine Beeinflussung des jungen Spritzbetons durch Grundwasser ist im Bauzustand nahezu auszuschließen.



*Bild 3: Schalenaufbau CombiShell*

Einer der Gründe des Verbruches beim HEX waren die bekannten Probleme bei der sachgemäßen Herstellung von Spritzbeton im Sohlbereich und insbesondere bei den Anschlüssen für die Teilquerschnitte (Ulmenstollen).

Im Bild 4 ist das Detail dargestellt, welches beim Projekt des Baggage-Tunnels in CombiShell ausgeführt wurde. Wichtig bei diesen Details ist die Baubarkeit hinsichtlich eines homogenen Spritzbetonauftrages ohne Rückprall einzuspritzen und einer hundertprozentigen Umhüllung von Bewehrung und Ausbaubögen (Vermeidung von Spritzschatten und Hohlräumen). Bei permanenten Spritzbetonschalen muss auf diesen Punkt besonderes Augenmerk gerichtet werden, um Korrosion der Stahleinbauten hintanzuhalten.

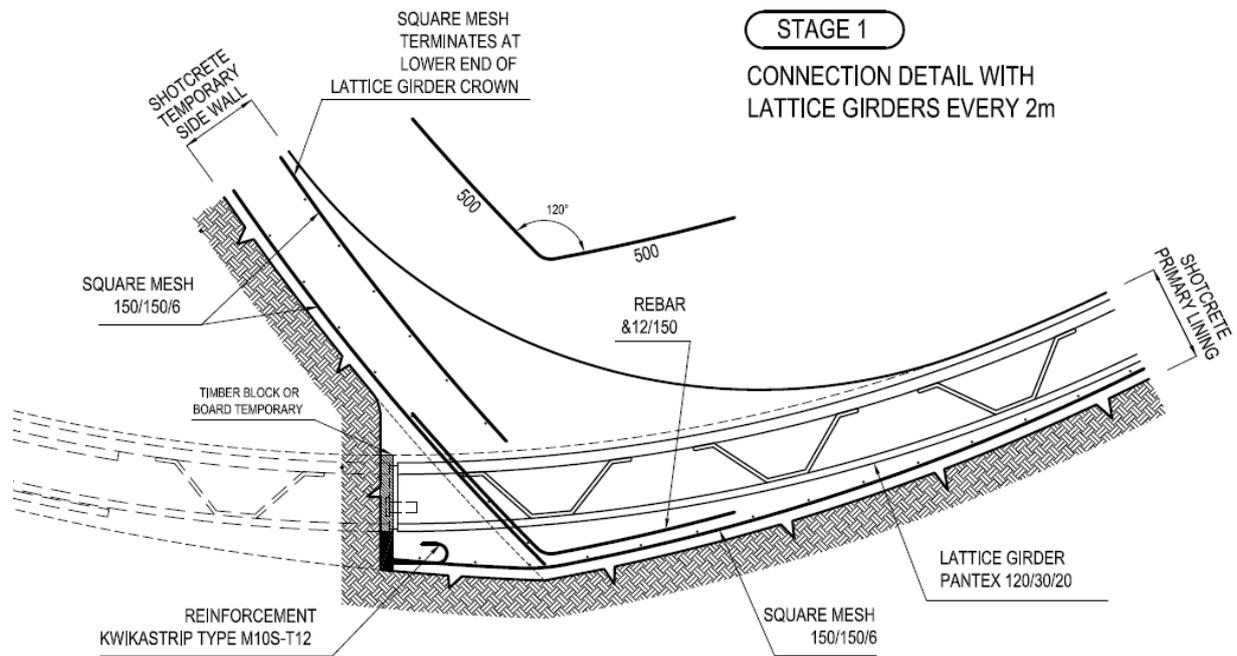


Bild 4: Sohldetail, Anschluss der temporären Schale des Ulmenstollens

Das Foto auf Bild 5 gibt einen Eindruck über die sachgerechte Ausführung des Schalenaufbaues im Übergang der Ulme in die Sohle des Baggage-Tunnels. Die sauberen Fugenabschlüsse und die Einbettung der Stahlelemente (Baustahlgitter, Gitterbögen) sind im Bild sichtbar.



Bild 5: Fugendetail Übergang Sohle-Ulme (Permanente Schale)



*Bild 6: Anschlussdetail Kalotte  
(Temporäre Außenschale Projekt U-Bahn-Bochum Los 306)*

Solche Details (Bild 4, Bild 5 und Bild 6) sind aber ausführungstechnisch sehr anspruchsvoll und nur mit einer sehr erfahrenen Mannschaft und durch strikte Qualitätskontrollen zufriedenstellend baubar. Beim Einbau von Gitterbögen und Baustahlgewebe im Zuge des Tunnelvortriebes bleibt aber bei permanenten Spritzbetonschalen die Fugenproblematik zwischen den Ausbruchs- und Sicherungsfolgen (klassische NATM/SCL-Querschnitts-Unterteilung in Kalotte/Strosse/Sohle) und es bleibt die latente Gefahr von Spritzschatten im Bereich der Gitterbögen und deren Anschlussdetails.

Bei Bauwerken, welche in hydrogeologisch unproblematischer Geologie (Beispiel Londoner Ton) oder über dem Grundwasserspiegel liegen, sind diese Probleme vernachlässigbar, da kein Wasserzutritt über Fugen und kleine Schwachstellen zu erwarten sind.

## 2.2 Entwicklungsschritt LaserShell

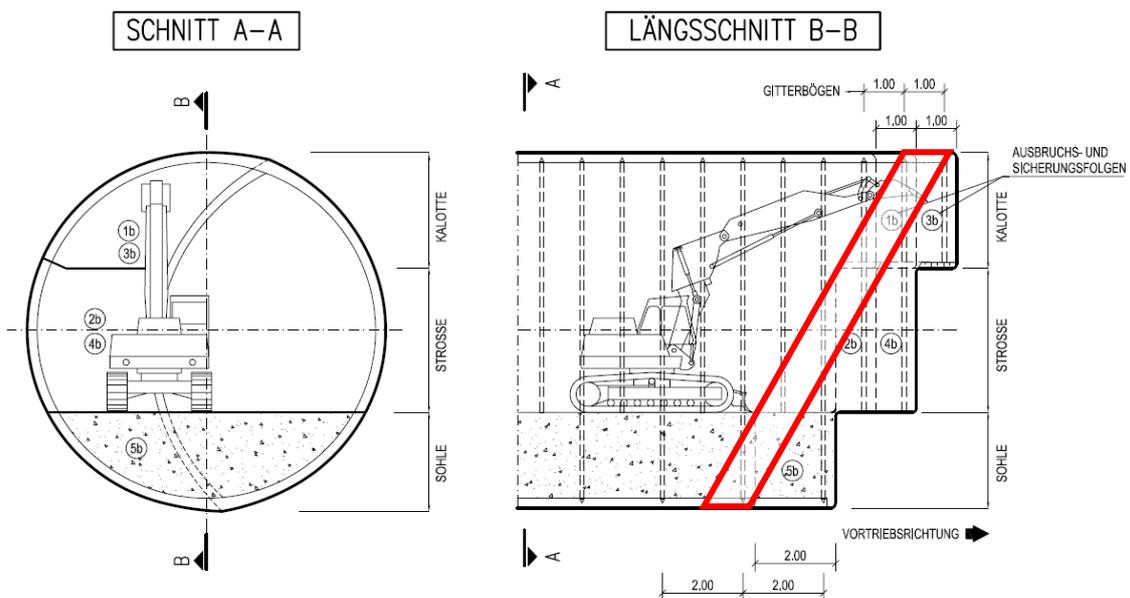
Der Bau des North-Downs Tunnels, der neuen Hochleistungs-Eisenbahnstrecke zwischen Dover und London, war Auslöser eines weiteren Entwicklungsschrittes von der CombiShell zur LaserShell. Dieser Tunnel wurde mit der NATM-Bauweise in der Geologie von weicher bis gesteinsharter Kreide aufgefahren und die Spritzbetonbauweise war für die ausführende Arbeitsgemeinschaft Morgan=Est, Beton- und Monierbau und Vinci ein voller Erfolg [7]. Ein Unfall im Vortrieb war dann Auslöser von Diskussionen mit der Behörde über Arbeitssicherheit. Beim Installieren einer Baustahlmatte im vorgeschitzten Firstbereich hatte sich ein Kreideblock gelöst und einen Mineur schwer verletzt.

Die englische Behörde forderte Überlegungen über Maßnahmen im Tunnelbau mit Spritzbeton anzustellen, um in Zukunft ein Exponieren der Mannschaft im nicht ausreichend gesicherten Hangenden des letzten Tunnelabschlags zu vermeiden. Ein Lösungsvorschlag bestand darin, dass anstatt Mattenbewehrung auf Stahlfaserbewehrung für den Spritzbeton umstellt wird und dass auf sonstige Einbauten, wie Ausbaubögen, verzichtet wird. Daher wurden Überlegungen angestellt, wie man eine Spritzbetonbauweise entwickeln kann, welche ohne Ausbaubögen (üblicherweise Gitterbögen) und Baustahlgitter auskommt und bei

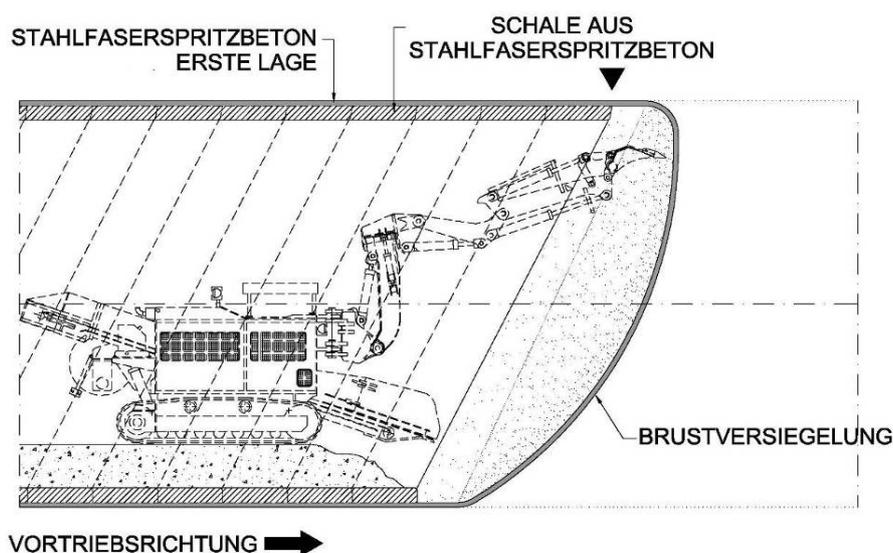
der keinerlei Exposition der Mannschaft im unmittelbaren Vortriebsbereich des letzten Abschlages garantiert ist.

Der Lösungsansatz war die LaserShell:

- Hochmechanisierter und in sicherheitstechnischer Hinsicht optimierter Vortrieb mit einer schrägen bombierten Ortsbrust
- Herstellung eines qualitativ hochwertigen permanenten Stahlfaserspritzbetons ohne Einbau von Stahlbögen und ohne Baustahlgitter
- Entwicklung und Verwendung eines neuen berührungslosen Vermessungssystems für die geometrische Kontrolle des Ausbruchs und der Spritzbetonschale (Tunnel-Beamer).



*Bild 7: Entwicklung von der CombiShell zur LaserShell:  
Idee „Salamivortrieb“ mit Stahlfaserbeton, Geneigte Ortsbrust ohne  
Horizontalfugen, bedeutend weniger Arbeitsschritte und größere Arbeitssicherheit*



*Bild 8: Prinzip der LaserShell*

Der Entwicklungsschritt von der konventionellen Spritzbetonbauweise im Lockergestein zur LaserShell ist im Bild 7 dargestellt und das Prinzip wird im Bild 8 wiedergegeben.

Da bei diesem Verfahren keine Gitterbögen eingesetzt werden, fehlt für die ausführende Mannschaft die von Abschlag (Ring) zu Abschlag notwendige geometrische Orientierung. Als Lösung wurde von Beton- und Monierbau und Morgan=Est ein spezielles Vermessungsgerät (TunnelBeamer Bild 9) entwickelt mit dem berührungslos jeder Punkt des Ausbruches und jeder Bauzustand des Aufbringens des Spritzbetonringes „in real time“ und vor Ort überprüft werden kann. Das System der LaserShell hat sich beim Projekt T5 des Flughafens London Heathrow bei über 1000 Metern Tunnel und Schächten verschiedenster Querschnitte ausgezeichnet bewährt [11]. Details der Entwicklungsschritte werden in der Tabelle 1 gezeigt.

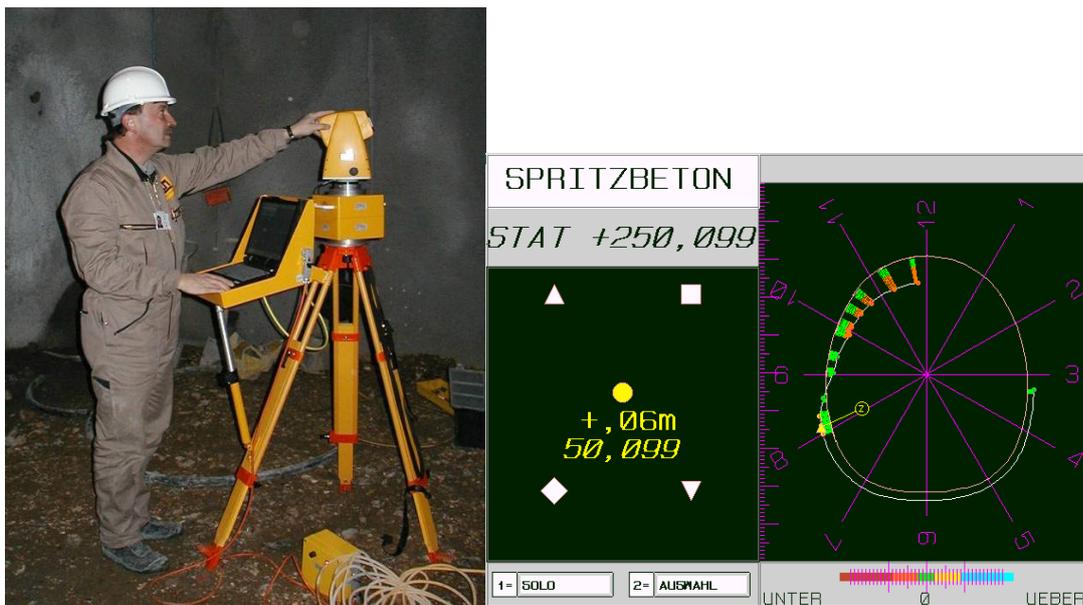


Bild 9: TunnelBeamer: Links Gerät, Rechts „real-time“-Profilkontrolle

Ein typischer Schalenaufbau der LaserShell ist im Bild 10 dargestellt.

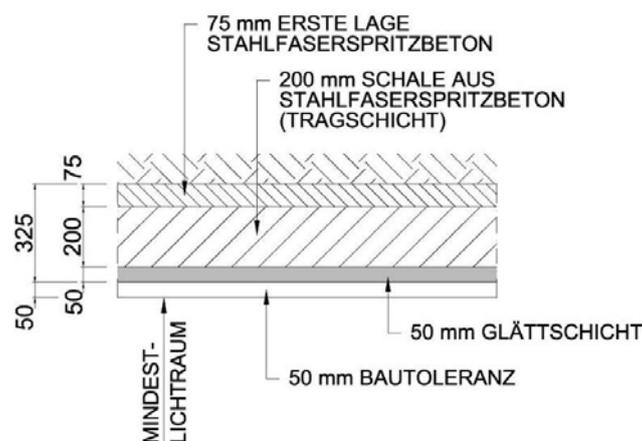


Bild 10: Typischer Schalenaufbau LaserShell (Projekt T5, Flughafen Heathrow)



*Bild 11: Spritzbetonauftrag mit Roboter und TunnelBeamer*



*Bild 12: Fertiggestellter LaserShell-Querschlag nach Aufbringen der Glättlage  
(ART Load Center Chamber, Projekt Flughafen T5-England)*

Ein zweiter Einsatz der LaserShell-Technologie im Londoner Ton war die Baustelle Kings-Cross der Arbeitsgemeinschaft Morgan=Est und Beton- und Monierbau, welche 2008 fertiggestellt wurde. Bild 13 und Bild 14 geben einen Eindruck der hohen Qualität der Spritzbetonschalen.



*Bild 13: LaserShell Projekt Kings-Cross London.  
LaserShell-Pilotstollen wird nachträglich mit größerem LaserShell-Querschnitt überfahren*



*Bild 14: Projekt Kings-Cross in London.  
In LaserShell fertiggestellter Fußgängertunnel aus Spritzbeton*

Ein wesentliches Merkmal der LaserShell ist, dass auf eine Bewehrung in Form von Baustahlgitter oder Stabstahl verzichtet wird. Es gibt nur Faserbewehrung, die auch Vorteile bezüglich des Arbeitsaufwandes hat. Bei kreisrunden oder annähernd kreisrunden Querschnitten unter vorwiegend isotroper Belastung (wie dies im Londoner Ton der Fall ist), bleibt der Schalenquerschnitt vorwiegend überdrückt. Sobald aber in bestimmten Fällen Sondergeometrien wie Querschläge, Überschneidungen, „nichtrunde“ Querschnitte notwendig sind, treten Zugkräfte aus Biegemomenten oder Membrankräften auf, die üblicherweise nicht mehr

von der Faserbewehrung allein aufgenommen werden können. Um eine exzessive Rissbildung vorzubeugen, ist deshalb eine Bewehrung in Form von Baustahlgitter oder Stabstahl einzubauen.

Sowohl beim Projekt T5 als auch bei Kings-Cross wurde die Glättlage noch mit relativ viel Handarbeit aufgebracht. Nicht das Aufbringen der Glättlage ist arbeitsintensiv sondern das Nachglätten. Für die Glättung werden Abziehlatten aus Aluminium eingesetzt, welche jeweils zwischen Schablonen aus Rundeisen geführt werden. Die Rundeisen werden wieder ausgebaut und die verbleibende Rille händisch nachgeglättet.

Es gibt Überlegungen die Glättlage vollmechanisch aufzubringen und es wurden teilweise statt Spritzbetonpumpen/Düsen auch Verputzpumpen verwendet. Die Ergebnisse sind zwar vom optischen Gesichtspunkt her sehr zufriedenstellend (Bild 14), aber der Arbeitsaufwand ist noch zu hoch und eine weitere Mechanisierung dieses Arbeitsschrittes der LaserShell wäre aus ökonomischen Gründen wichtig.

### 2.3 Entwicklungsschritt UltraShell

Die Auslöser zum Entwicklungsschritt von der LaserShell zur UltraShell waren 2 noch mit der LaserShell ungelöste Probleme:

- Wasserdichtigkeit
- Stahlbewehrung bei Auftreten von Biegezug, welcher durch Stahlfasern alleine nicht abgedeckt werden konnte

#### **Wasserdichter Spritzbeton-Tunnel:**

Bei Spritzbeton, welcher im Vortrieb eingebaut wird, sind Risse nicht zu vermeiden. Auch nicht mit der Lösung nach der LaserShell. Bei der LaserShell sind zwar viel weniger Fugen und keine Spritzschatten im Vergleich zur klassischen Bauweise mit Gitterbögen und Baustahlgitter vorhanden, aber Risse treten auf.

Eine Lösung dieses Problems ist der Einbau einer elastischen Abdichtung. Solche Abdichtungen gibt es als Folienisolierung (PVC-Folien, PE-Folien etc.) oder als gespritzte Isolierung. Spritzisolierungen sind bekannt aus den Bereichen des Brückenbaues oder bei Tunnel-Senkkasten-Verfahren. Diese Isolierungssysteme sind auf Latex- oder Bitumen oder ähnlichen Materialien. Es gibt auch Spritzisolierungen auf Zement-Polymer-Basis.

Vorteile der Folienisolierung ist die hohe Dehnbarkeit und die über 40 Jahre Anwendungserfahrung in Tunnels. Beim Einsatz einer Folienisolierung zwischen zwei Spritzbetonschalen gibt es das bekannte Problem der unvermeidbaren Hohlräume insbesondere im Firstbereich des Tunnels durch das Durchhängen der Folien. Hinter den Folien ist meist ein Vlies, welches wasserdurchlässig ist und dieses Vlies verursacht oft eine nachteilige Längsdrainage des Tunnels. Der Auftrag von Spritzbeton auf Folienisolierung ist in vielen Projekten erfolgreich durchgeführt worden, trotzdem bleiben die Probleme des Hohlraums hinter der Folie.

Vorteil einer Spritzisolierung ist die Vermeidung des oben genannten Hohlraum-Problems. Außerdem kann der Spritzbeton auf eine Spritzisolierung ohne Zusatzmaßnahmen (wie Gitterbögen, Baustahlgewebe, „Hasengitter“) direkt aufgebracht werden, da der Spritzbeton gut auf der Spritzisolierung haftet.

Nachteil der Spritzisolierung ist die nicht gleichwertig machbare Dichtigkeitsprüfung wie bei den Folienisolierungen (Dichtbahnen können vorab geprüft werden, Schweißnahtprüfungen

vor Ort sind problemlos) und die anspruchsvolle Qualität der Untergrundvorbereitung. Zudem gibt es noch nicht viel praktische Erfahrung über den erfolgreichen Einsatz der Spritzisolierungen im Tunnelbau. Verglichen mit der Folienisolierung ist natürlich die Dehnbarkeit der Spritzisolierungen begrenzt, da im Falle eines Risses, aufgrund der Haftung der Spritzisolierungen, die Rissbrücke das Isoliermaterial auch auf einer sehr kurzen Dehnlänge stark beansprucht.

Trotzdem wird es Bereiche im Tunnelbau geben, wo Spritzisolierungen sehr erfolgreich sein werden und andere, wo die Folienisolierungen auch weiterhin in bewährter Form angewendet werden.

### Thema Bewehrung bei Auftreten von Biegezug:

Stahlbewehrung wird heute in manchen Bereichen des konstruktiven Ingenieurbauwes mit Textilbewehrung ersetzt (Brückenbau, Sanierungen, Fassadenbau, Fertigteiletechnik). Textilbewehrung hat gegenüber Stahl Vorteile betreffend Korrosionseigenschaften.

Eine andere Möglichkeit der Abdeckung von Biegezugspannungen ist die Verwendung von PVA-Fasern (Poly Vinyl Alcohol Fiber siehe Bild 15) in sogenannten HPFRCC oder "Engineered Cement Composite (ECC)" Hochleistungsbetonen/Mörtel [12, 13, 14].

Firma	Faser	Länge [mm]	Durchmesser [mm]	Zugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Bruchdehnung [%]
Kuraray	Kuralon REC 15	6	0,04	1800	6



*Bild 15: PVA Fasern der Firma Kuraray mit Daten  
(Bildquelle: Prof. Dr. Kusterle)*

In Bild 16 ist der Vergleich mit anderen Betonarten mittels Spannungs-Dehnungslinie dargestellt.

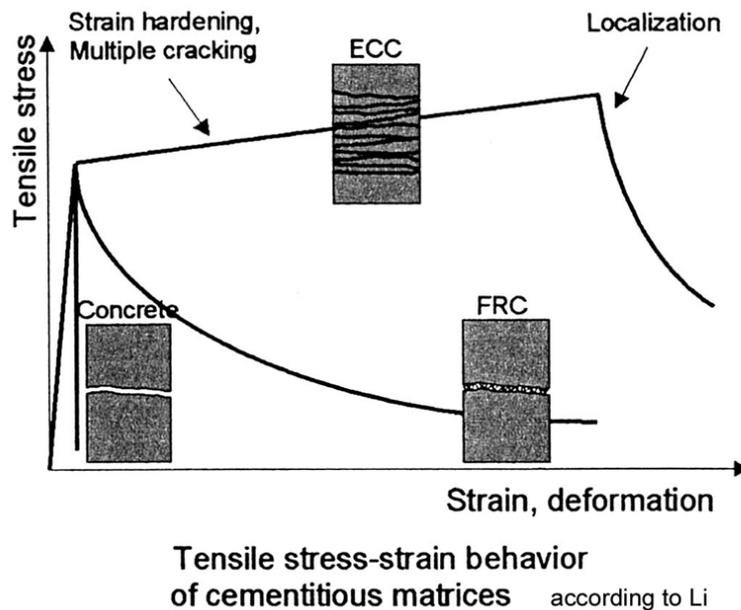


Bild 16: Spannungs-Dehnungsverhalten von unbewehrtem Beton (links), Konventionellem Faserbeton (FRC, rechts) und ECC (oben Mitte). Nach [15].

Diese Überlegungen führten zur Entwicklung der UltraShell: Warum nicht die dünne Glättlage der LaserShell aus einem hochwertigen, wasserdichten und zugfesten Spritzbeton herstellen? Bild 17 zeigt unser erstes Gedankenmodell für die UltraShell in Spritzbetonbauweise.

Bild 18 zeigt die Details des Schalenaufbaues des Gedankenmodells UltraShell.

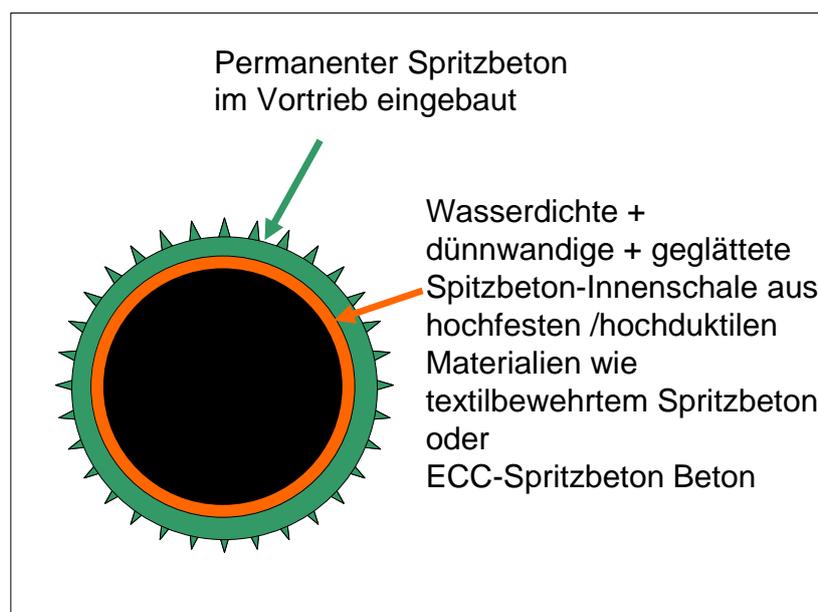


Bild 17: Gedankenmodell UltraShell

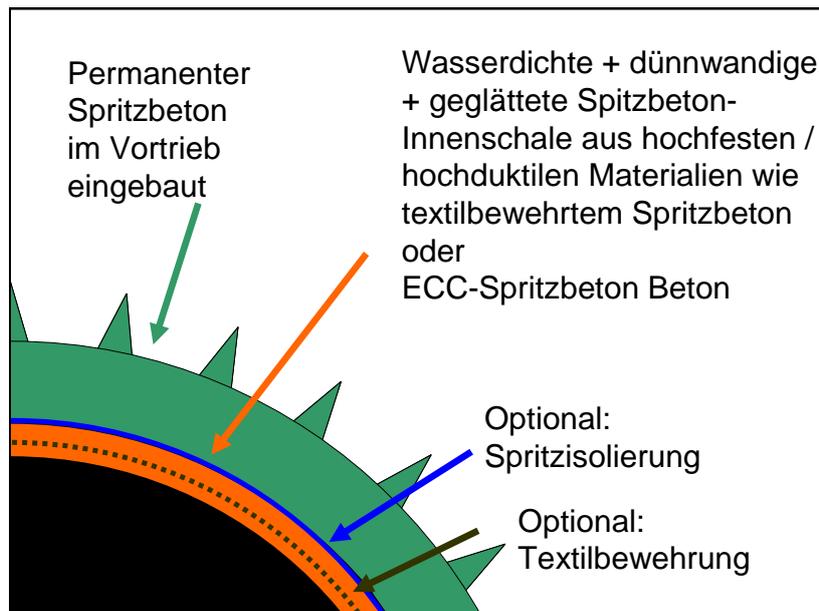


Bild 18: Detail Schalenbau UltraShell

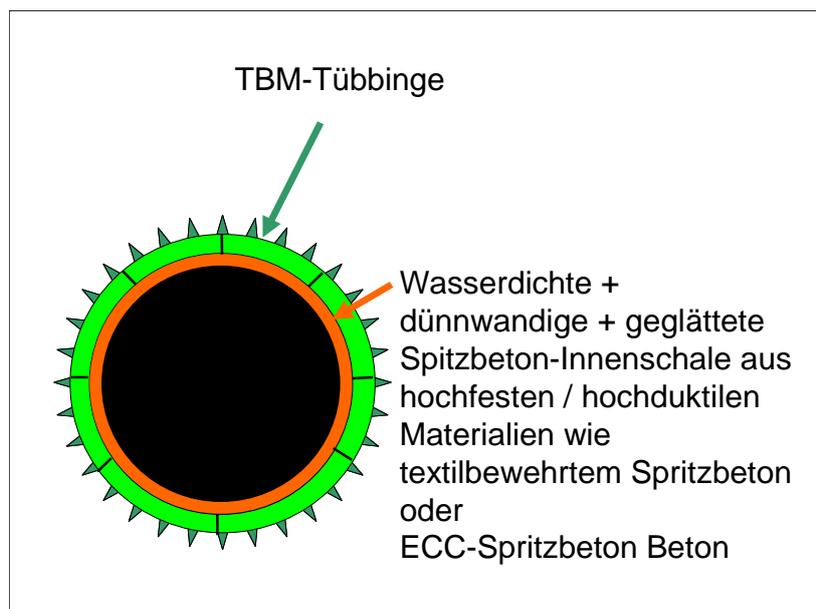
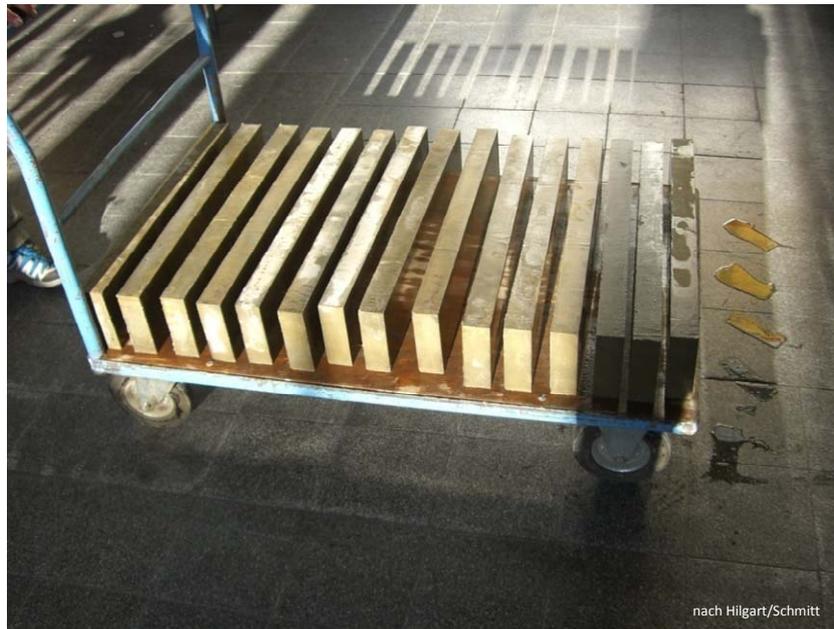


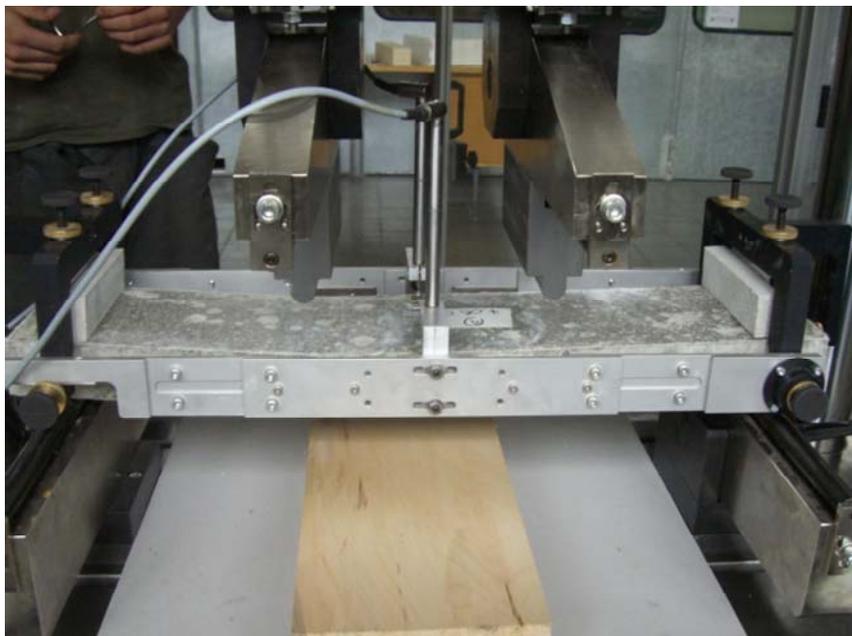
Bild 19: UltraShell in Kombination mit TBM-Tübbingen

Als Kombination mit einem in TBM-Bauweise mit Tübbingen hergestellten Tunnel, wie im Bild 19 dargestellt, würde die Innenschale bei nicht druckdichten Tübbingen die Funktion der Abdichtung übernehmen, kann aber auch als dünne bewehrte Verstärkungs-Schale gesehen werden. Auch Anwendungen in Tunnels mit Innendruck (Druckstollen) sind dabei denkbar. Als erster Schritt für die Entwicklung der UltraShell stand die Auswahl von geeigneten Fasern, Textilbewehrungen und Rezepturen. Eine der Untersuchungen wurden im Rahmen einer Forschungsarbeit im Auftrag von Beton- und Monierbau und Morgan=Est von Prof. Dr.

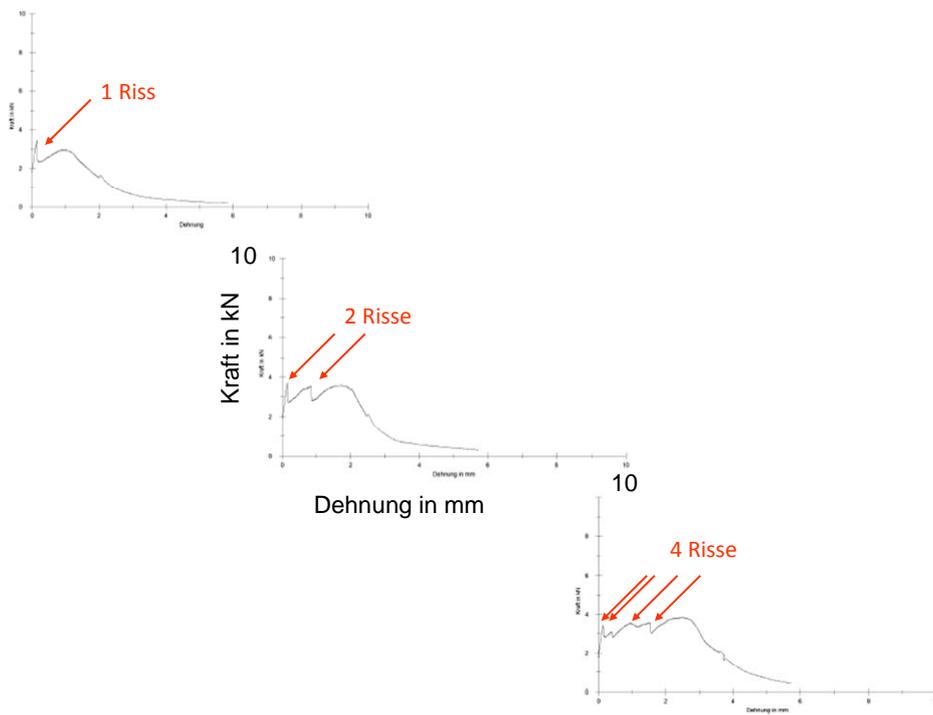
Kusterle an der Hochschule in Regensburg [16 und 17] Bild 20 bis 27 durchgeführt. Zusätzliche Untersuchungen erfolgten in England unter der Leitung von Morgan=Est.



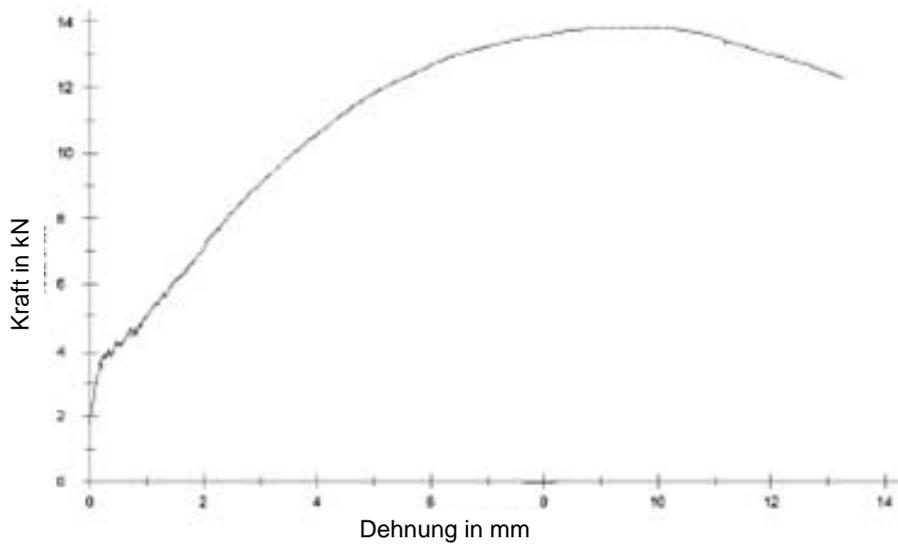
*Bild 20: Für 5 cm dicke Faser- und Textilbewehrte Spritzmörtelchichten wurden an der Hochschule Regensburg umfangreiche Versuchsserien gefahren (Probekörperabmessungen: 15 x 5 x 700 mm. Regelprüfalter 14 Tage, Bild: Hilgart/Schmitt)*



*Bild 21: Biegeversuch mit Dreipunktbelastung und 600 mm Spannweite (Bild Hilgart/Schmitt)*



*Bild 22: Last-Verformungskurven unterschiedlicher Mischungen mit jeweiliger Rissanzahl (Bild Hilgart/Schmitt)*

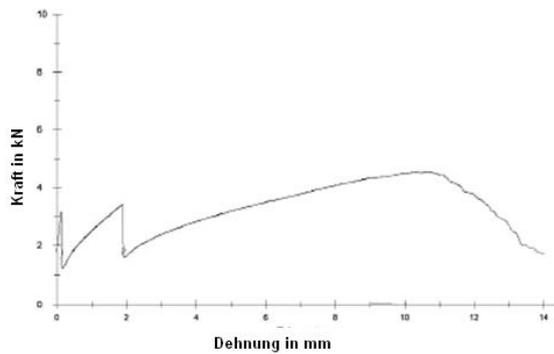


*Bild 23: Ideale Last-Verformungskurve von Balken hergestellt mit Zementleiminfiltrations-Methode. Es entstehen 70 Risse an der Prüfkörper-Zugseite (Bild Hilgart/Schmitt)*

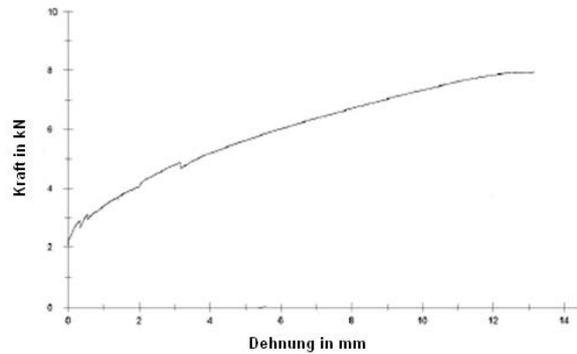


nach Hilgart/Schmitt

*Bild 24: Herstellung von Probekörpern mit Zementleiminfiltrations-Methode. Diese hoch Stahlfaserbewehrten Proben sind natürlich nicht spritzbar! (Bild Hilgart/Schmitt)*



5 Lagen Glasfasermatte  
2 Risse



5 Lagen Glasfasermatte  
2 Vol % Kunststoffaser  
7 sichtbare Risse

*Bild 25: Beeinflussung des Nachbruchsverhaltens durch Verwendung von textiler Bewehrung und einem Cocktail aus Textiler- und Faserbewehrung. (Bild Hilgart/Schmitt)*

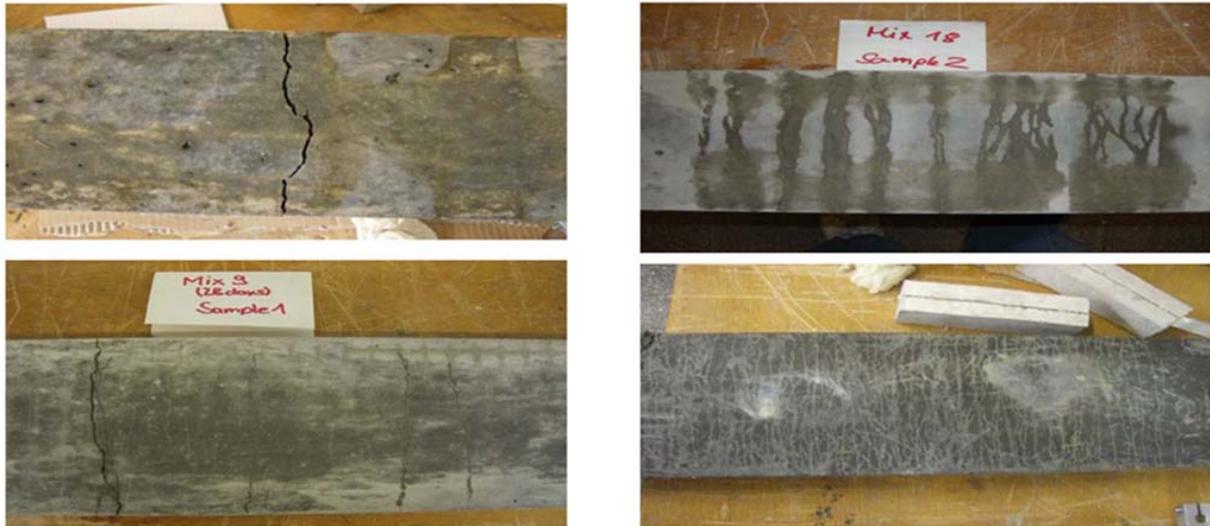


Bild 26: Mögliche Rissbilder an Zugseite von Biegebalken (Bild Hilgart/Schmitt)

Die Untersuchungsergebnisse bestätigen die Eignung der vorhandenen Materialien (Fasern, Textilgewebe) für die UltraShell. Es fehlen aber noch Erfahrungen in Kombination mit der Anwendung als Spritzbeton im Tunnelbau außerhalb von Laborbedingungen.

Die in Bild 27 dargestellten Versuchskurven machen deutlich, dass bei der Beurteilung des Nachrissverhaltens unbedingt auch die Abmessungen des Prüfkörpers miteinbezogen werden müssen. Bei gleichem Werkstoff weist die größere Probe ein deutlich spröderes Verhalten auf als die kleinere Probe. Dieser Maßstabeffekt, der sich sowohl auf die Festigkeit als auch auf die Duktilität des Bauteils auswirkt, ist typisch für spröde Materialien und in der neueren Fachliteratur auch erklärt [27].

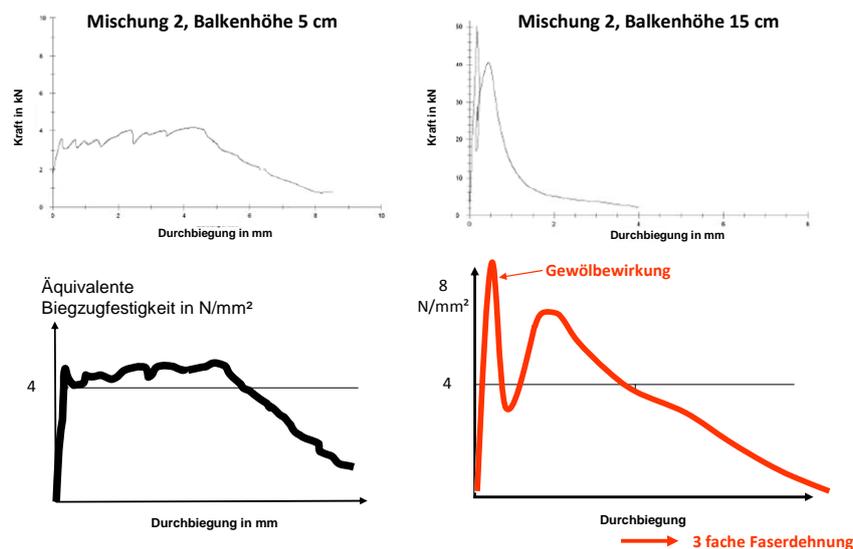


Bild 27: Gegenüberstellung von Prüfergebnissen von Balken mit unterschiedlicher Dicke aber gleicher Betonzusammensetzung im Biegezugversuch (Bild: Kusterle)

## 2.4 Zusammenfassung und Gegenüberstellung der Entwicklungsschritte

Die zeitliche Abfolge der Entwicklung ist auf Bild 28 dargestellt.



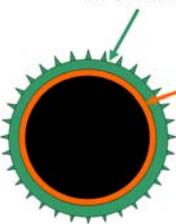
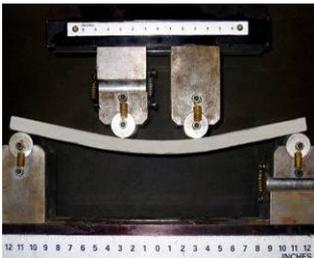
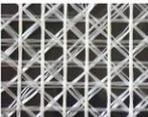
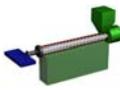
*Bild 28: 15 Jahre Entwicklung von der CombiShell über die LaserShell zur UltraShell*

Die folgenden Tabellen 1 und 2 erläutern unsere Entwicklung der permanenten Spritzbetonschalen für Tunnels im Londoner Ton.

Dabei werden die jeweiligen Entwicklungsziele, die Ideen, die hinter dem Systemaufbau stehen und die Vor- und Nachteile der jeweiligen Entwicklungsschritte getrennt angeführt.



Tabelle 2: Entwicklungsschritt UltraShell

Entwicklungs - Schritt	Ziel	Idee, Systemaufbau Systemskizze	+ Plus Punkte	- Minus Punkte
UltraShell	<p>Wie LaserShell aber statt der Glättlage eine in einem speziellen Arbeitsgang hergestellte Spritzbeton-Innenschale aus hochfestem Beton.</p> <p>Permanenter im Vortrieb aufgebrachter Spritzbeton wirkt im Verbund mit hochfester dünner wasserdichter Schale aus Spezialbeton.</p> <p>Hochfester Beton soll Trag- und Dichtfunktion kombinieren und dünnchalig sein (Dünnwandige wasserdichte Tunnelauskleidung)</p> <p>Wasserdicht</p>	<p>Als Spritzbetonbauweise im Längenschnitt wie LaserShell oder CombiShell aber auch im System kombinierbar als wasserdichte „Innenschale“ für konventionelle NATM-Tunnels oder als wasserdichte Innenschale für TBM-Tunnels oder Druckstollen.</p> <div style="text-align: center;"> <p><b>Permanenter Spritzbeton im Vortrieb eingebaut</b></p>  <p>Wasserdichte + dünnwandige* + geglättete Spitzbeton-Innenschale aus hochfesten /hochduktilen Materialien wie textildbewehrtem Spritzbeton oder ECC-Spritzbeton Beton</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p><b>TBM-Tübbinge</b></p>  <p>Wasserdichte + dünnwandige* + geglättete Spitzbeton-Innenschale aus hochfesten / hochduktilen Materialien wie textildbewehrtem Spritzbeton oder ECC-Spritzbeton Beton</p> </div> <p>Materialien für die „Innenschale“:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Textildbewehr (Spritzbeton oder Gussbeton)</b></li> </ul> <div style="text-align: center;">  <p><small>Bildquelle: Rainer Hempel, Leiter der AG Baustofftechnik am Institut für Baustoffe der TU Dresden, Textildbewehrter Beton – ein neuer Verbundbaustoff. Bild 1</small></p> </div> <p><b>oder Faserbewehrter Spritzbeton/Gussbeton mit:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• HPFRCC: High Performance Fiber Reinforced Cement Composites</li> <li>• SHCC: Strain Hardening Cement-based Composites</li> <li>• ECC: Engineered Cementitious Composites</li> <li>• HPFRCC with multiple fine cracks (=SHCC in Japan)</li> </ul> <div style="text-align: center;">  <p><small>Bildquelle: Michigan University, Prof. Dr. Li. <a href="http://www.umich.edu/news/Releases/2005/May05/img/bend_ecc.jpg">http://www.umich.edu/news/Releases/2005/May05/img/bend_ecc.jpg</a></small></p> </div>	<p>Wie LaserShell aber zusätzlich wasserdicht.</p> <p>Glättschale gleichzeitig hochfester tragender Baustoff auf der Innenseite des fertigen Tunnels (Bewehrungsfunktion).</p> <p>Textildbewehrung bereits bekannte Technologie</p> <div style="text-align: center;">   <p><small>Bildquelle: Rainer Hempel, Leiter der AG Baustofftechnik am Institut für Baustoffe der TU Dresden, Textildbewehrter Beton – ein neuer Verbundbaustoff. Bild 2</small></p> </div>	<p>Hohe Materialkosten der wasserdichten Innenschale (spezielle Fasern, Textildbewehrung, Betonchemie und Zuschlagstoffe).</p> <p>Neue Technologie im Tunnelbau: Untertagebaubedingungen! Mischen und Einbauen von hochwertigen Betonen auf der Baustelle?</p> <p>Untergrund/ Feuchtigkeit?</p> <p><b>LÖSUNGSANSÄTZE:</b></p> <p>Glättung manuell? Glättung in Kombination mit Verputzmaschinen?</p> <p>Extrusionsverfahren mit mechanisierter Glättung?</p> <div style="text-align: center;">  </div> <p>Einbau der dünnwandigen Innenschale mit Schalwagen?</p>

### 3. Statische Betrachtungen

In statisch-konstruktiver Hinsicht ergaben sich folgende Fragestellungen, die mit der Verwendung von Spritzbeton als permanentem Baustoff von Tunnelschalen im Lockergestein verbunden sind:

- Beeinträchtigt die hohe Auslastung des Spritzbetons im Ortsbrustbereich die Dauerhaftigkeit des Tragwerks?
- Wie könnte ein Bemessungskonzept für permanenten Faserspritzbeton aussehen?
- Wie wirken sich der lagenweise Einbau der Spritzbetonschale und die unterschiedlichen Beanspruchungen der einzelnen Lagen auf die Gesamtragfähigkeit aus?

#### 3.1 Hoch ausgelasteter Spritzbeton für permanente Tunnelinnenschalen?

Diese Frage wurde speziell bei der Entwicklung der LaserShell intensiv erörtert. Auslöser dafür war eine Feststellung in der Spritzbetonrichtlinie [21], die sich auf Untersuchungen von Rokahr und Lux [19] bezieht. Demnach sei bei einem Auslastungsgrad jenseits der 80 % mit Gefügestörungen im Spritzbeton zu rechnen. Hier ist allerdings anzumerken, dass diese Aussage auf einem Versuch mit ganz bestimmten Randbedingungen basiert (Probenalter: 24 h, Abmessungen  $l/d=17.5 \text{ cm} / 10 \text{ cm}$ ). Es ist fraglich, ob ein ähnliches Verhalten für Spritzbeton generell, unabhängig vom Hydratationsgrad, beobachtet werden kann.

Die Ergebnisse von Druckfestigkeitsprüfungen für die LaserShell (siehe auch Abschnitt 4.2), aber auch allgemein an jungen Spritzbetonwürfeln und Prismen [23], könnten dahin gehend gedeutet werden, dass eine frühe Druckbelastung auch einen günstigen Einfluss auf die Endfestigkeit haben kann, weil die vorbelasteten Proben etwas höhere Endfestigkeiten aufweisen als die unbelasteten Referenzproben. Eine mögliche Erklärung dafür wäre, dass die Vorbelastung ähnlich wie eine Verdichtung wirkt.

Welche Auslastungsgrade eine Spritzbetonschale erfahren wird, lässt sich mit numerischen Simulationen abschätzen, sofern die Eingangsparameter vorliegen. Generell gilt auch hier, dass sich mit zunehmender Komplexität der Modelle und der damit verbundenen Möglichkeit der genaueren Erfassung von Randbedingungen einerseits eine höhere Treffsicherheit der Prognose möglich ist. Andererseits sind die Eingangsparameter jedoch zum Zeitpunkt der Prognose oft noch nicht klar und auch später unvermeidlich einer teilweise erheblichen Streuung unterworfen. Eine Sensitivitätsuntersuchung der Berechnungsergebnisse bezüglich der Variation der Parameter (geotechnische Parameter, Stützmittelparameter, Bauablauf) wäre erforderlich, um zumindest die Bandbreite der möglichen Ergebnisse zu verdeutlichen.

Darüber hinaus ist die versuchstechnische Erfassung der Spritzbetoneigenschaften innerhalb der ersten 10 Stunden schwierig. Eine „indirekte“ Bestimmung der thermo-mechanischen Spritzbetoneigenschaften mittels numerischer Modellierung des Hydratationsprozesses [18] kann hier hilfreich sein. Die so ermittelten Ergebnisse werden aber abhängig von den auch hier erforderlichen Eingangsparametern wohl auch einer Streuung unterworfen sein, sodass trotz umfangreicher Berechnungen wohl keine verbindliche Aussage zum Auslastungsgrad gemacht werden kann. Diesem Umstand Rechnung tragend, wurde in Heathrow eine kurze Versuchsstrecke aufgeföhren, in der das Konzept der LaserShell bestätigt werden konnte.

Dieser eigens für die LaserShell entwickelte Spritzbeton wurde zusätzlich einem umfangreichen Versuchsprogramm unterzogen (siehe dazu Abschnitt 4.2).

### 3.2 Bemessungskonzept für Faserbeton

Während die Bewehrung der CombiShell mit Stabstahl erfolgte, war für die LaserShell Stahlfaserbewehrung vorgesehen. Davon ausgenommen waren Kreuzungsbauwerke oder Sonderkonstruktionen, wo der erforderliche Querschnittswiderstand nur mit Stahlbeton erzielbar ist. Mit den mit Spritzbeton noch gut verarbeitbaren Faserkonzentrationen von bis zu  $50 \text{ kg/m}^3$  wird die maximale Zugfestigkeit des Stahlfaserbetons von der Zugfestigkeit der Betonmatrix dominiert. Anders als bei stabstahlbewehrten Betonquerschnitten kommt es bei stahlfaserbewehrten Querschnitten nach der Erstrissbildung zu einem deutlichen Festigkeitsabfall (Bild 29).

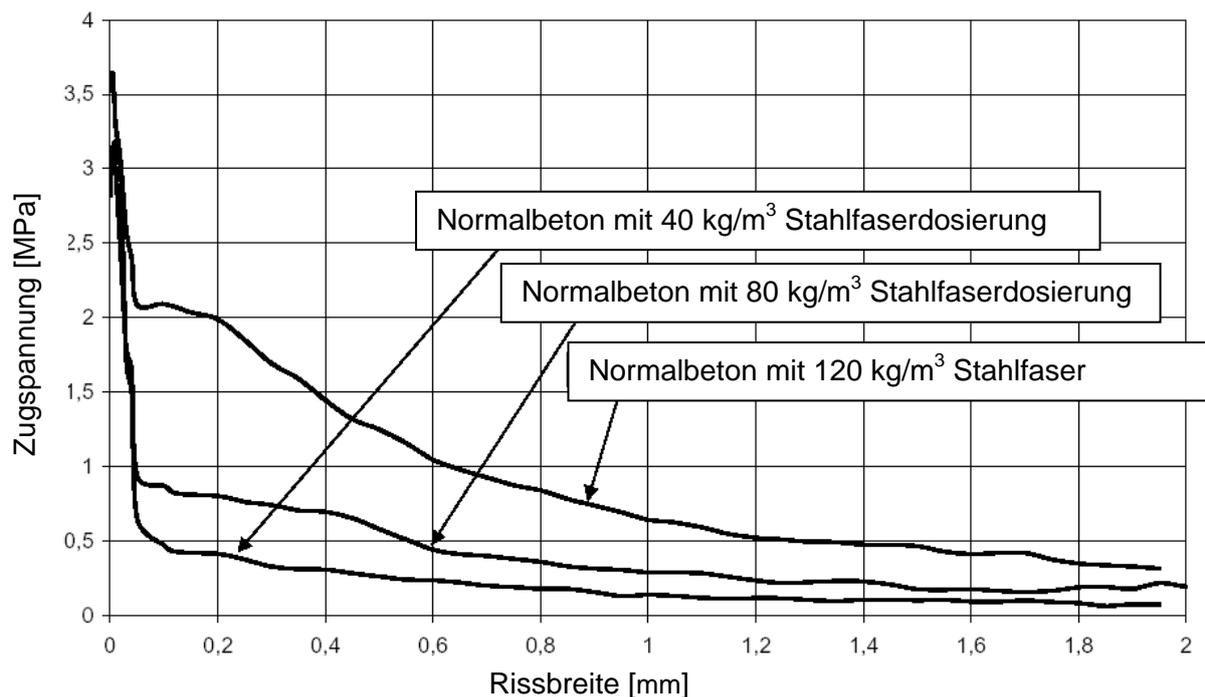


Bild 29: Nachrisszugfestigkeit in Abhängigkeit der Rissbreite [24]

Die Stahlfasern verleihen der Spritzbetonschale somit gutmütiges, duktileres Bruchverhalten. Aus diesem Grund wird der Teilsicherheitsbeiwert für Stahlfaserbeton mit  $\gamma_c=1,5$  anstatt  $\gamma_c=1,8$  für unbewehrten Beton gewählt.

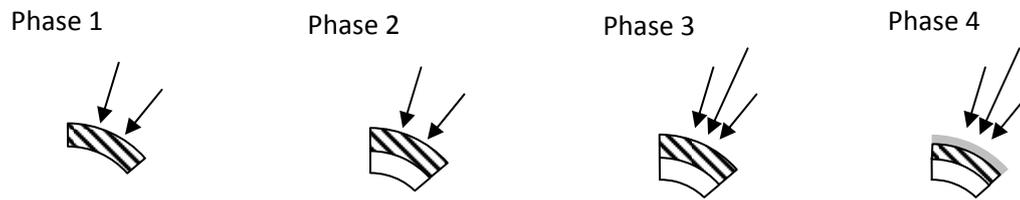
Die Ermittlung der Querschnittstragfähigkeit der Faserbetonquerschnitte erfolgte nach der in Richtlinie Faserbeton [22] beschriebenen Vorgangsweise.

Wegen mangelnder Erfahrung im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit von Stahlfaserbeton wurde die von den Stahlfasern kommende Zugfestigkeit nur bei den kurzzeitigen Lastfällen der Bauzustände berücksichtigt. Die Bemessung der LaserShell für den permanenten Beanspruchungszustand erfolgte für unbewehrten Beton, wobei allerdings der Teilsicherheitsbeiwert von  $\gamma_c=1,5$  beibehalten wurde.

### 3.3 Dimensionierung bei zeitlich versetztem, lagenweisen Einbau

Durch den zeitlichen Versatz des lagenweisen Einbaus der permanenten Spritzbetonschale ergeben sich je nach Zeitpunkt der Einbringung unterschiedliche Beanspruchungszustände

in den jeweiligen Lagen. In der Folge sei nun vorausgesetzt, dass der Einbau der Lagen in einem so großen zeitlichen Abstand erfolgt, dass keine Kriechumlagerungen von den außen liegenden Lagen auf die inneren Lagen stattfinden.

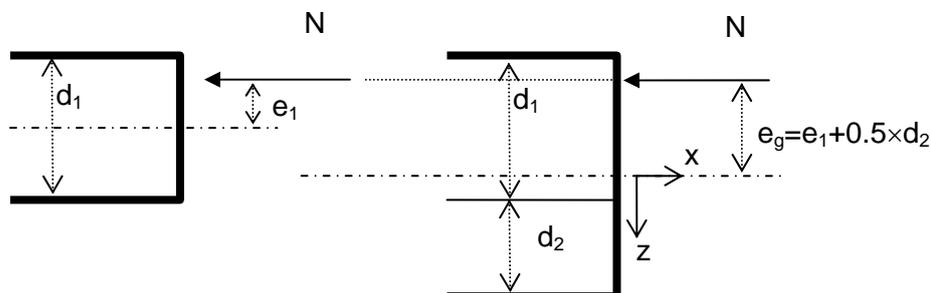


*Bild 30: Bauphasen und Beanspruchung der Spritzbetonlagen einer Spritzbetonschale*

Während bei der LaserShell im Gebrauchszustand das endgültige statisch wirksame Tragwerk schon voll zur Lastabtragung herangezogen wird, sind bei der CombiShell und bei der UltraShell im Gebrauchszustand lediglich die äußeren, bergseitigen Lagen beansprucht (Phase 1). Die später eingebrachten inneren Lagen erfahren eine zusätzliche Beanspruchung lediglich durch Eigengewicht und durch später auftretende Gebirgs- und Wasserdrücke, wobei natürlich noch Zwangsspannungen aus Temperatur, aus Schwinden etc. entstehen (Phase 3).

Wegen möglicherweise ungünstiger Umwelteinflüsse im Laufe der Lebensdauer des Tragwerks wird eine 5cm bis 10 cm dicke Schicht der bergseitigen Spritzbetonlage nur für die temporäre Lastabtragung mitberücksichtigt. Für den permanenten Beanspruchungszustand wird von einem „Zerfall“ dieser Schicht in bodenähnliches Material ausgegangen, was dann rechnerisch durch einen reduzierten Querschnitt berücksichtigt wird. Die auf diese äußere Schicht wirkende Belastung wird dann auf den verbleibenden Spritzbetonquerschnitt umgelagert (Phase 4 in Bild 30).

Mit dem herkömmlichen Nachweisformat für unbewehrten Beton [19] (ohne Berücksichtigung der ungewollten Ausmitte  $e_a$ ) führt eine zusätzliche, unbelastete Spritzbetonlage rechnerisch zu keiner Erhöhung der Tragfähigkeit, wenn aufgrund der Belastung eine bergseitige Exzentrizität oder Ausmitte vorliegt:



*Bild 31: bergseitige Exzentrizität*

Die Tragfähigkeit  $N_{u1}$  der ersten Lage lässt sich aus der bekannten Formel für den unbewehrten Beton ermitteln:

1. Lage: 
$$N_{u1} = f_{cd} \cdot b \cdot d_1 \cdot (1 - 2e_1/d_1)$$

$$1.\text{Lage}+2.\text{ Lage: } N_{ug} = f_{cd} \cdot b \cdot d_g \cdot (1-2e_g/d_g) = f_{cd} \cdot b \cdot (d_1+d_2-2[e_1+0.5 \cdot d_2]) = f_{cd} \cdot b \cdot d_1 \cdot (1-2e_1/d_1)$$

$$\text{Daraus folgt: } N_{u1} = N_{ug}$$

Bei einer rein querschnittsbezogenen Sicherheitsbetrachtung erhöht die auf der Innenleibung aufgetragene 2. Spritzbetonlage nicht die Gesamttragfähigkeit  $N_{ug}$ . Eine genauere Betrachtung mit einer über eine Grenzstauchung von  $\varepsilon_{cu}=0.35\%$  definierte Tragfähigkeit liefert dasselbe Ergebnis.

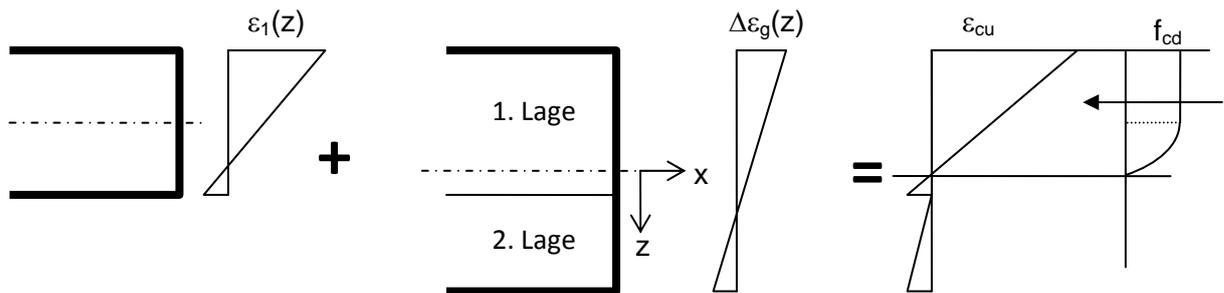


Bild 32: Betonstauchung und Spannungsdiagramm bei bergseitiger Exzentrizität

Der Dehnungsanteil  $\Delta\varepsilon_g(z)$  entspricht der Zunahme der Stauchung bis zur Grenzstauchung, die erst nach dem Einbau der zweiten Lage erreicht werden soll. Bei der Ermittlung der Grenzzustandsschnittgrößen  $N_u$  und  $M_u$  wird ein Dehnungszustand gesucht, der zumindest in einem Punkt des Betonquerschnitts die Grenzstauchung von  $\varepsilon_u=0.35\%$  erreicht, wobei die Exzentrizität  $e = M_u/N_u$  konstant bleibt.

Eine Steigerung der Tragfähigkeit bei bergseitiger Exzentrizität durch die 2. Spritzbetonlage kann somit durch den reinen Querschnittsnachweis nicht berücksichtigt werden, weil sich die absolute Lage der Druckkraft  $N$  bei einer Nachweisführung auf der Querschnittsebene nicht ändert. Um die erhöhte Tragfähigkeit angemessen berücksichtigen zu können, ist deshalb eine Nachweisführung auf der Systemebene zu wählen.

Die Auswirkung einer solchen Betrachtungsweise auf der Systemebene sei an einem einfachen Beispiel erläutert.

In der Berechnung wird zunächst die erste, 225 mm dicke, Spritzbetonlage eingebracht. Anschließend erfolgt der Einbau einer 75 mm starken zweiten Spritzbetonlage. Im nächsten Schritt wird die vorhandene, charakteristische Gebirgslast auf das 1,35-fache Last (Bemessungslast) gesteigert. Im letzten Schritt findet der Zerfall der äußeren 75 mm statt, indem diese programmtechnisch entfernt werden.

Die Berechnungen wurden an Balkenelementen, bestehend aus 20 Schichten durchgeführt, sodass den einzelnen Schichten verschiedene Materialeigenschaften zugeordnet werden können. Details dazu können der Programmbeschreibung des FE-Programms ZSoil [26] entnommen werden.

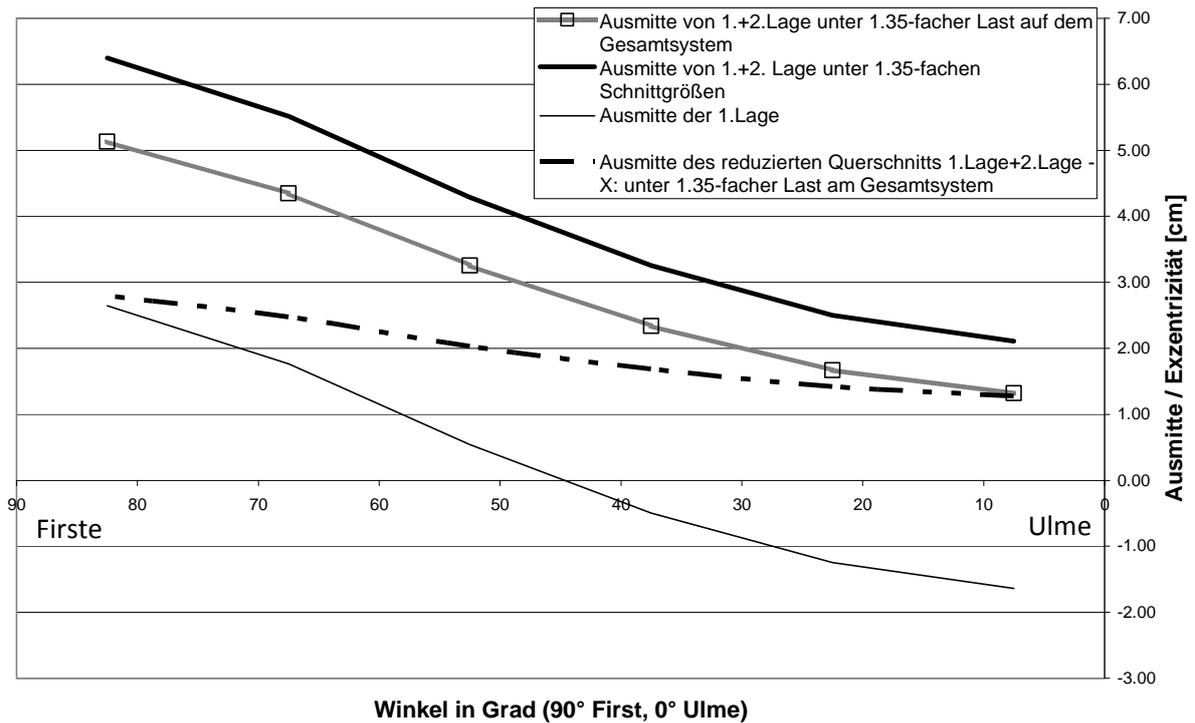


Bild 33: Änderung der Exzentrizität in Abhängigkeit der Bauphasen

Wie in Bild 33 dargestellt, führt die Nachweisführung auf Systemebene zu einer Reduktion der Ausmitte um rund 1 cm gegenüber der Nachweisführung auf Querschnittsebene.

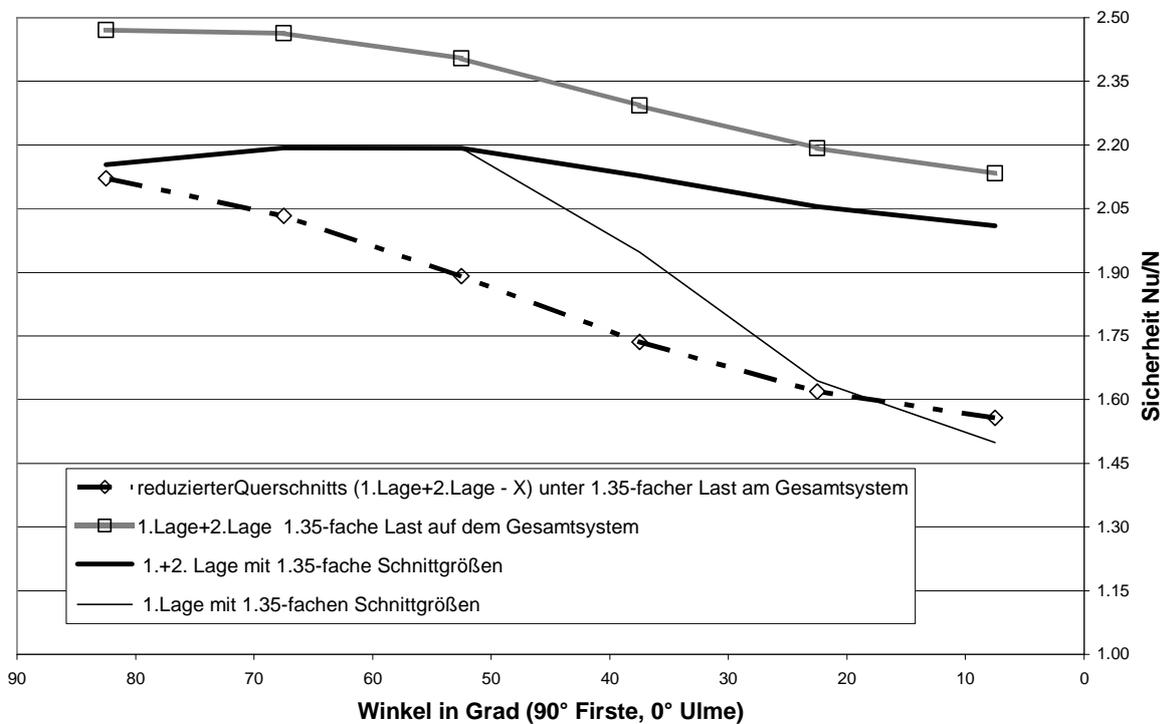


Bild 34: Änderung der Tragfähigkeit in Abhängigkeit der Bauphasen

Die Auswirkung dieser Reduktion im Hinblick auf die Tragfähigkeit ist im Bild 34 dargestellt. Demnach führt die Berechnung auf Systemebenen bis zu 15 % höheren Sicherheitsfaktoren. Bemerkenswert ist auch, dass die Tragfähigkeit der endgültigen 225 mm dicken Schale (bestehend aus 1. Lage 225 mm + 2. Lage 75 mm abzüglich der zerfallenen 75 mm Lage) eine geringere Tragfähigkeit aufweist, als jene der ebenfalls 225 mm dicken 1. Lage während der ersten Bauphase. Bei einer luftseitigen Exzentrizität führt das Aufbringen der 2. Lage rechnerisch zu einer Tragfähigkeitssteigerung:

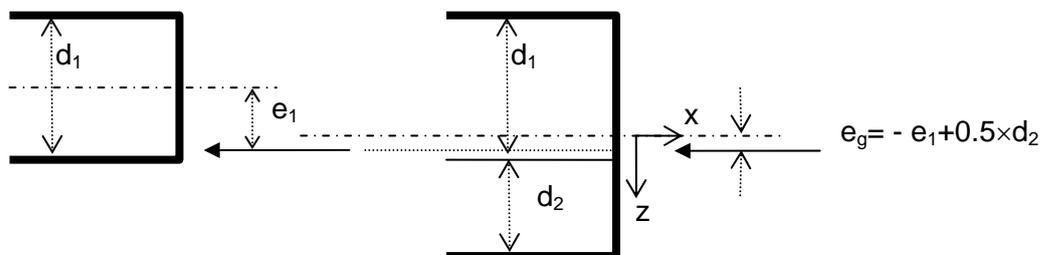


Bild 35: luftseitige Exzentrizität

1. Lage:  $N_{u1} = f_{cd} \cdot b \cdot d_1 \cdot (1 - 2e_1/d_1)$

1.Lage+2. Lage:  $N_{ug} = f_{cd} \cdot b \cdot d_g \cdot (1 - 2e_g/d_g) = f_{cd} \cdot b \cdot (d_1 + d_2 - 2|-e_1 + 0.5 \cdot d_2|)$

Daraus folgt:  $N_{u1} < N_{ug}$

Damit bleibt die ungünstige Vorbelastung der ersten Schale unberücksichtigt. Wenn allerdings der Grenzzustand, wie in den Stahlbetonnormen üblich, über die maximale Betonstauchung  $\epsilon_{cu}$  definiert ist, dann muss bei einer hoch belasteten ersten Spritzbetonlage die Tragfähigkeit geringer sein, als dies von den oben angeführten Formeln vermittelt wird, weil dort ja die Vorbelastung gar nicht eingeht.

Da die erste Spritzbetonlage in jungem Alter wahrscheinlich deutlich höhere Stauchungen als 0.35 % erfährt, ist hier von dem im Spritzbeton vorherrschenden Spannungsniveau ein dem Normalbeton entsprechender Stauchungszustand zu ermitteln, der dann die Grundlage für die weiteren Berechnungen bildet [25].

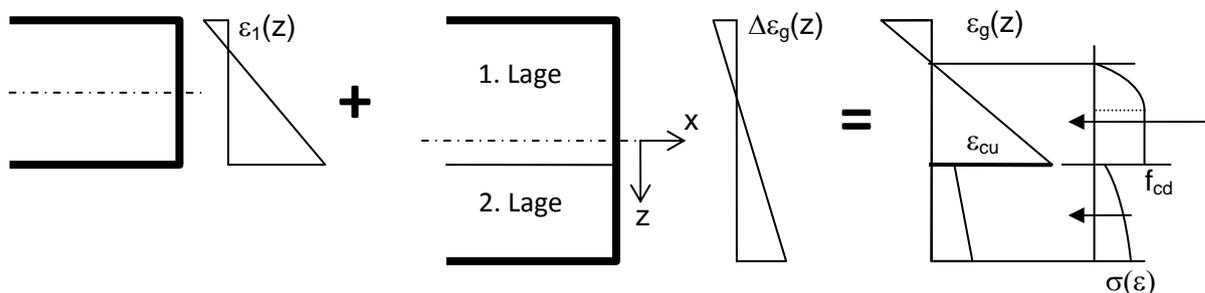


Bild 36: Betonstauchung und Spannungsdiagramm bei luftseitiger Exzentrizität

Vergleichsrechnungen ergaben, dass nur bei einer hoch beanspruchten ersten Spritzbetonlage (Auslastung bei rund 90 %) eine genauere Ermittlung unter Berücksichtigung der Vorstauchung erforderlich ist, um eine Überschätzung der Gesamttragfähigkeit zu vermei-

den. In der Regel werden aber die ersten Lagen auf die 1,35-fachen Gebrauchslasten dimensioniert und weisen damit eine Auslastung von höchstens 74 % auf.

#### 4. Materialtechnologie Permanenter Spritzbeton

##### 4.1 CombiShell (1994 – 2002)

Bei der Planung der CombiShell wurden relative niedere Druckfestigkeiten spezifiziert. 25 MPa für die Außenschale und 35 MPa für die Innenschale [5]. Die Schalen wirken im Verbund. Erstarrungsbeschleuniger mit niederm Alkalianteil und Fortschritte in der Materialtechnologie in dieser Zeit gaben genug Vertrauen, dass die Bauteile eine Lebensdauer von 100 Jahren erreichen.

Unabhängig davon wurden trotzdem sehr umfangreiche Voruntersuchungen und Tests durchgeführt, um das kurz- und langfristige Verhalten zu untersuchen. Das Testprogramm inkludierte einen Dauerbeständigkeitstest, welcher von Professor Dr. Kusterle an der Universität Innsbruck durchgeführt wurde. Das Testprogramm verwendete Zeitraffer-Techniken und dauerte zwölf Monate. Die Druckfestigkeit und die Steifigkeit von beschleunigtem und nicht-beschleunigten 0-Betonen wurden während der Test-Zeit verglichen und es wurden keine nachteiligen Prozesse in den vorgeschlagenen Mischungen für den Spritzbeton festgestellt [8 und 9].



Bild 37: Untersuchung des der Spritzbeton-Rezepturen für die CombiShell im Elektronenmikroskop (Bildquelle: Universität Innsbruck, Dr. Saxer)

Die Rezepturen (Tabelle 3) für die Außen- und Innenschalen waren ähnlich.

Tabelle 3: Spritzbetonrezeptur CombiShell

Zement OPC 42,5 N	450 kg/m <sup>3</sup>
10 mm Kies	425 kg/m <sup>3</sup>
Grade M Sand	1220 kg/m <sup>3</sup>
Micro Silica Slurry	65 kg/m <sup>3</sup>
Retarder	4,8 kg/m <sup>3</sup>
Plastifizierer	2,5 kg/m <sup>3</sup>
Wasser	160 kg/m <sup>3</sup>
Polypropylenfaser	1,8 kg/m <sup>3</sup>
Erstarrungsbeschleuniger	14,4 kg/m <sup>3</sup>

Es wurde das Nass-Spritzverfahren noch ohne Spritz-Roboter verwendet. Für die Außenschale wurde Verzögerer zur Erreichung einer längeren Verarbeitungsfähigkeit der Mischung eingesetzt (zusätzlich zum an der Spritzdüse beigegebenen Erstarrungsbeschleuniger. Für die Innenschale wurde nur eine minimale Menge von Erstarrungsbeschleuniger eingesetzt. Die Sieblinie der Zuschlagstoffe wurde auf hohe Dichte (Fuller-Kurve) mit einer maximalen Korngröße von 10 mm geplant.

Da die Arbeiten in sehr sensiblen Zonen des Flughafens gebaut wurden, waren geringe Setzungen des Bodens sehr wichtig. Frühfestigkeit J3 nach der Österreichischen Richtlinie wurde gefordert.

Sehr rigorose Bauaufsicht und Tests wurden bei diesem Projekt implementiert und dies hat sich auch weiterhin bei den Projekten, welche jetzt in England gebaut werden, bewährt.

Eine Kombination von Kernbohrungen und Frühfestigkeits-Tests mittels Hilti-Bolzen wurde durchgeführt. Würfel des nichtbeschleunigten 0-Betones für den Vergleich mit beschleunigtem Beton wurden getestet, um sicherzustellen, dass der Festigkeitsabfall unter 40 % bleibt (Bemerkung: ein viel höher Wert als heutzutage akzeptiert).

Die Resultate des Testprogrammes für die charakteristischen 28-Tage-Festigkeiten waren wie folgt:

Geplante Druckfestigkeit Außenschale	25 MPa
Druckfestigkeit 0-Beton (Würfel 150 mm)	55 MPa
Druckfestigkeit von Kernen aus dem Bauwerk (100 mm Kerndurchmesser umgerechnet auf Würfel Druckfestigkeit)	35 MPa

#### 4.2 LaserShell (2002-Heute)

Während die relativ einfache Rezeptur der CombiShell die damals erforderlichen Anforderungen erfüllte, haben die Anforderungen betreffend Arbeitssicherheit die Entwicklung der LaserShell-Methode eingeleitet.

Die Hauptunterschiede der Materialtechnologie zwischen CombiShell und LaserShell kann in folgenden Punkten zusammengefasst werden:

- Durchgehende, geneigte Spritzbetonringe wirken als monolithische Schalen im Verbund
- Die Biegezugfestigkeit (Nachrisszugfestigkeit) wird durch Stahlfaserbewehrung erreicht
- Mit Zuschlägen aus magmatischen Gestein in Verbindung mit Polypropylen-Fasern wird eine ausgezeichnete Feuerbeständigkeit erreicht

Sehr umfangreiche Labortests, gefolgt von 1:1 Feldversuchen mit 24 verschiedenen Rezepturen wurden untersucht.

Besonderes Augenmerk wurde auf den Dichtheitsgrad der Zuschlagstoffe gerichtet und in der Endversion wurde eine Sieblinie mit 6 mm Granitkörnung und Granit-Staub (Steinmehl) eingesetzt. Diese Mischung zeichnete sich durch hervorragende Bindung/Lagenbindungs-Charakteristik aus, aber die Bindung zu den Stahlfasern war so stark, dass Sprödbruch in den frühen Versuchen beobachtet wurde.

Um die geforderte Nachrisszugfestigkeit (Beispiel der Testergebnisse siehe Bild 38) zu erreichen, wurde daher entschieden Dramix Hochleistungsfasern (High Carbon, Dramix BP 80/30) zu verwenden. Dadurch wurde ein sehr hohes Arbeitsvermögen erreicht.

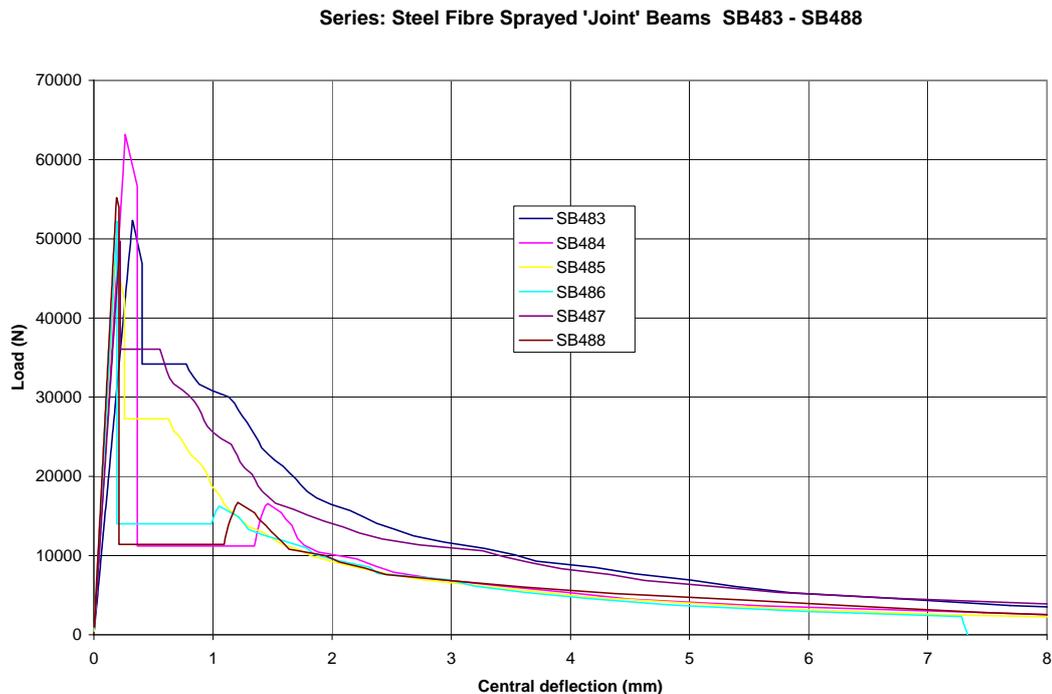
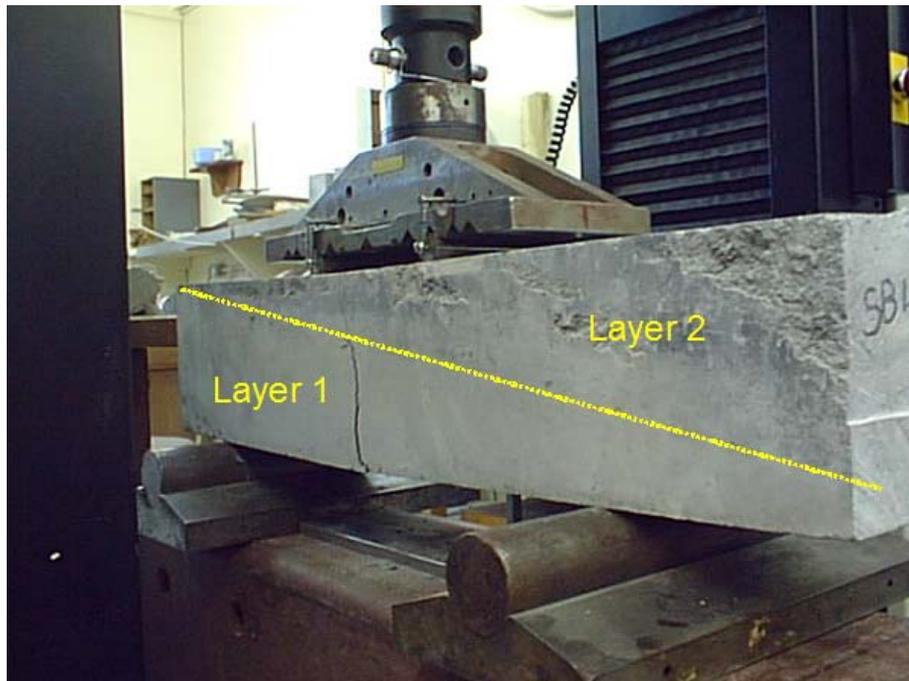


Bild 38: Erste Biegebalken-Versuche ( ohne „High Carbon Fibre“)

Um zu zeigen, dass jede gespritzte Lage der LaserShell-Schale im Verbund mit der Nachbarlage wirkt, wurden Testserien durchgeführt, um die strukturelle Belastbarkeit dieser Nahtstellen untersuchen zu können. Träger aus Spritzbeton mit zwei Hälften wurden hergestellt (Bild 39 und Bild 40) mit jeweils 24 Stunden Zeitdifferenz zwischen den Spritzlagen. Diese Träger wurden auf Biegung und Nachrisszugfestigkeit (Zähigkeit) getestet. Bohrkern, welche durch die Nahtstellen (Trennflächen) gebohrt wurden, sollten jedwede Verminderung der Tragfähigkeit an den Nahtstellen evaluieren.

Die Kerne und die Schnitte durch die Träger, welche während der Tests und dann aus dem Bauwerk genommen wurden, haben gezeigt, dass keine wahrnehmbaren Festigkeitsverluste an den Nahtstellen feststellbar sind. Tatsächlich waren auch mit dem Augenschein in vielen Fällen keine Nahtstellen zu erkennen.

Um die Frühfestigkeit und die Steifigkeit des jungen Betons evaluieren zu können, wurden zusätzliche Versuche gemacht. Leider gibt es keine praktisch machbare Methode um Probekörper von erstarrungsbeschleunigtem Beton zu messen, deshalb wurden nicht-beschleunigte Prismen mit äquivalenten Festigkeiten untersucht.



*Bild 39: Zweilagig gespritzter Träger im Test*



*Bild 40: Schnitt durch einen zweilagig gespritzten Biegebalken*

Das Test-Programm (Bild 41) hat gezeigt dass auch solche Proben, welche sehr hohen und frühen Belastungen ausgesetzt waren, keine Festigkeitsverluste im Vergleich mit unbelasteten Versuchskörpern erlitten. Versuche mit Auslastungsgraden (definiert als das Ver-

hältnis zwischen Festigkeit und aufgebrachter Druckspannung) zwischen 30 % und 80 % wurden getestet. Die Resultate schienen nicht mit den bereits publizierten Untersuchungen übereinzustimmen, welche davon ausgingen, dass hohe Auslastungsgrade langfristige Schäden am Spritzbeton nach sich ziehen.

Mit diesem Versuch lassen sich auch die in den statischen Berechnungen angesetzten Steifigkeiten rechtfertigen.



*Bild 41: Test der "Jungen" LaserShell-Mischung*

In Ergänzung zur hohen Qualität der Materialien für die LaserShell-Methode wurde auch erkannt, dass die Tunnel-Mannschaft und die verwendeten Geräte eine sehr große Rolle für die Qualität der permanenten Spritzbetonschale haben.

Ein rigoroser Trainings- und Zulassungskurs wurde organisiert. Teilnehmer an diesem Kurs waren erfahrene Düsenführer und Pumpenfahrer und folgende Themen waren Bestandteil des Kurses:

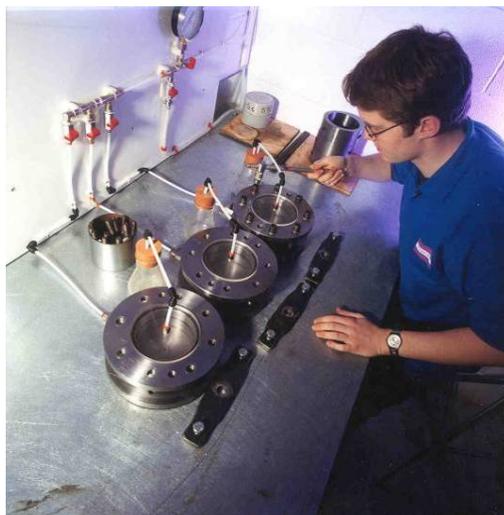
- Grundlagen der Planung von Spritzbetonschalen
- Gerätehandhabung und Gerätewartung
- Roboterspritzen (Bild 42)
- Handgeführtes Spritzen
- Arbeitssicherheit und Arbeitshygiene

Das Personal wurde gefordert, sowohl mit der Hand als auch mit dem Roboter zu spritzen. Stichproben wurden gezogen und sowohl optisch als auch labormäßig geprüft. Nur wenn die Leute den praktischen und schriftlichen Test bestanden haben, wird ein Zeugnis mit Zulassung zum Pumpenfahrer oder Düsenführer ausgestellt.



*Bild 42: Düsenführer während praktischer Prüfung im Zulassungstest*

Zusätzlich zur Druckfestigkeitsprüfung wurden Hunderte von Bohrkernen gezogen, um die Wasserdurchlässigkeit zu prüfen. Ergebnisse zeigten einen sehr dichten und wasserundurchlässigen Beton mit Werten unter  $1 \times 10^{-13}$  m/sec. Quer zu den nicht vermeidbaren Spritzfugen konnte aber eine wesentlich geringere Wasserdurchlässigkeit festgestellt werden. Daraus folgt, dass zusätzliche Maßnahmen erforderlich sind, wenn totale Wasserdichtigkeit des Bauwerkes gefordert ist.



*Bild 43: Wasserdurchlässigkeitstest mit 10 bar-Druckzellen*

#### 4.3 UltraShell (2006-Heute)

Nach den Erfolgen mit der LaserShell-Methode wurde der nächste Entwicklungsschritt mit der UltraShell gestartet. Hier wird die "Außenschale" als LaserShell hergestellt, gefolgt mit einer Innenschale aus faserverstärktem HPFRCC-Betonen (Hochleistungsbeton) und/oder Textilbewehrten Hochleistungsbetonen.

HPFRCC oder "Engineered Cement Composite (ECC)" Konzept wurde erstmals von Professor Victor Li von der Michigan University (USA) in den 1990er Jahren entwickelt und verwendet das Prinzip von hohen Konzentrationen von äußerst zugfesten Fasern, um einen hoch-verformbaren, "biegbaren Beton" (Bild 44) herzustellen [12 bis 15]. Die eigentliche Attraktion der HPFRCC-Materialien ist ihre Eigenschaft über weite Dehnungsbereiche ein leicht verfestigendes Materialverhalten zu zeigen. Daraus ergibt sich die Möglichkeit wasserdichte Strukturen herzustellen. Diese makroskopisch beobachtbare Dehnungsverfestigung resultiert aus einer sehr feinen Risseverteilung, anders als bei Faserbetonkonstruktionen üblich. Der hohe Zementanteil hilft auch zur Selbstheilung der Struktur.

Poly Vinyl Alcohol (PVA) Fasern von der Firma Kuraray aus Japan wurden bereits getestet und die Resultate machen uns sehr zuversichtlich. Zur zusätzlichen Verstärkung der Struktur gibt es auch die Möglichkeit textile Gewebe einzubauen (aus PVA, Glasfaser oder Kohlenfasern). Besonders die Kohlenfaserbewehrung scheint eine kosteneffektive und verlässliche Form der Bewehrung zu sein. Diese Textilbewehrung ist einfach zu schneiden, kann recht einfach im Tunnel fixiert werden und auch das Einspritzen mit dem HPFRCC-Material ist möglich.

Viele Tests wurden bereits gefahren und derzeit wird im Tunnel ein Versuch (Bild 45) durchgeführt. (Full-Scale-Test). Betonrezepturen wurden bereits entwickelt und die Arbeit geht weiter mit Untersuchungen, die Rezepturen als Spritzbeton zu verarbeiten. Die Rezepturen und die Zusatzmittelchemie, welche die Rheologie der Materialien beeinflusst, ist wesentlich für den Erfolg der Anwendung dieser Materialien. Nur mit einer richtigen Rheologie kann die unbedingt notwendige gleichmäßige Faserverteilung für die Dehnungsverfestigung gewährleistet werden.

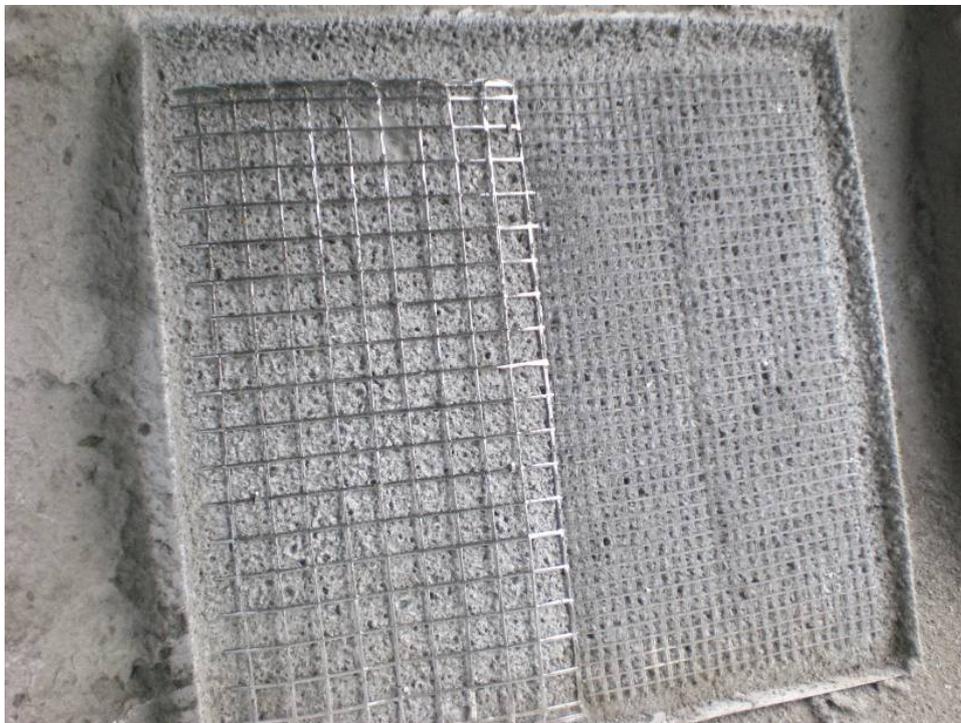


*Bild 44: Biegezugversuch eines HPFRCC-Testkörpers*

Ein Testprogramm zur Untersuchung der einaxialen Zugfestigkeit in einem direkten Zugversuch der UltraShell-Rezeptur läuft derzeit in England und Resultate sind mit Anfang 2009 zu erwarten.



*Bild 45: Erster UltraShell-tunnel in Großbritannien*



*Bild 46: Erste Spritzversuche mit verschiedenen Textilbewehrungen  
(Links Karbongewebe, rechts PVA)*

Der Querschnitt und ein Detail im Bild 47 und Bild 48 zeigt einen Entwurf für einen Fußgängertunnel im Londoner Ton.

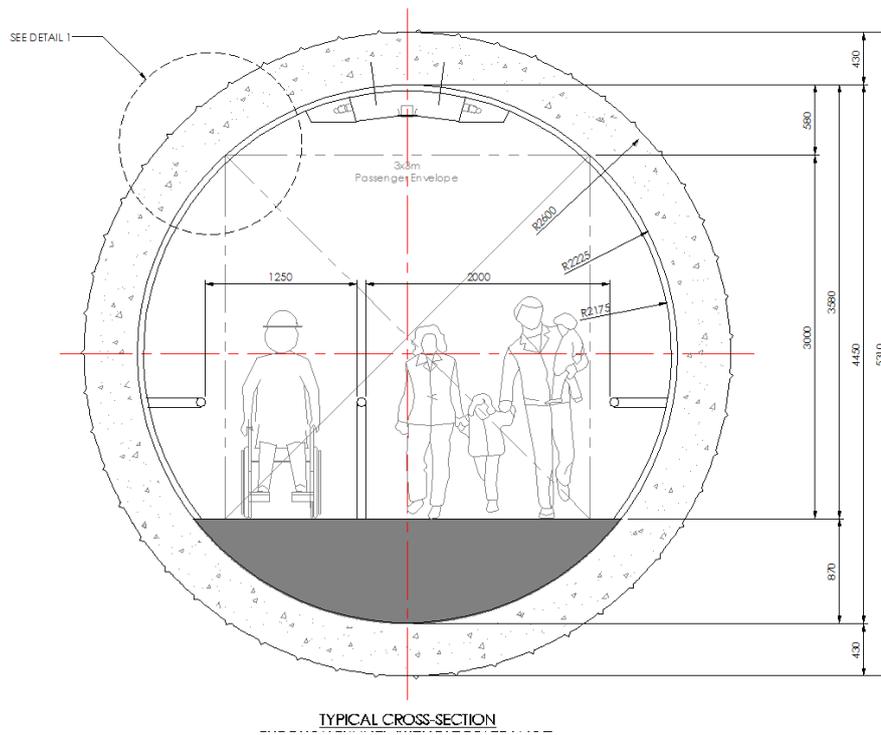


Bild 47: Querschnitt Fußgängertunnel mit UltraShell (Detail Bild 50)

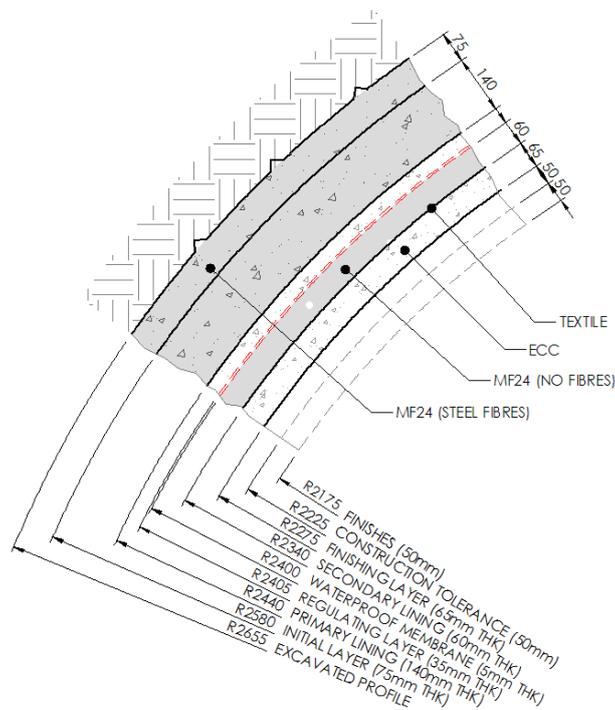


Bild 48: Anwendungsbeispiel eines Fußgängertunnels mit UltraShell

## 5. Zusammenfassung und Ausblick in die Zukunft

Die konsequente Weiterentwicklung von permanenten Spritzbetonschalen für Tunnels im Londoner Ton über einen Zeitraum von 15 Jahren war nur in Zusammenarbeit mit verschiedensten Disziplinen der Tunnelbautechnik, Statik- und Festigkeitslehre und der Materialwissenschaften möglich.

Es ist auch wichtig zu bemerken, dass der sehr homogene und geotechnisch gut erforschte Londoner Ton ein ideales Labor für diese Entwicklung war. Bei inhomogenen Lockergesteinen, wie diese vielfach in anderen Zonen Europas vorkommen, wären die Bedingungen nicht so ideal, da die Art des Verbaues und Ausbaues für die Spritzbetonbauweise dann auch sehr stark wechseln und laufend angepasst werden müssen.

Die bereits ausgeführten Projekte mit den Methoden der CombiShell und LaserShell wurden von sehr erfahrenen Tunnelbauern mit speziell ausgebildeten Mannschaften und rigoroser Überwachung von erfahrenen Ingenieuren erfolgreich gebaut. Wenn erfahrenes Personal und erfahrene Firmen dafür nicht vorhanden sind, muss man davon abraten, komplexe Tunnelbauwerke in Lockergestein oder Böden mit Spritzbetonmethoden zu bauen. Das gilt umso mehr für die in diesem Beitrag vorgestellten Spezialverfahren.

Die Methode LaserShell wurde beim Projekt Heathrow T5 entwickelt und in einer großen Anzahl von Tunnels angewandt. Der Bauherr BAA (British Airways Authority) unterstützte großzügig die Entwicklung der Methode und die Materialrezepturen und ca. 1.000.000 Euro wurden im Entwicklungsprogramm aufgewendet.

Die Entwicklungen waren nur möglich, da Planer, Bauherren, Prüfungsorgane und Behörden die von uns vorgeschlagenen Innovationen als Partner mitgetragen haben.

Das Umfeld in England war besonders geeignet diese Entwicklungen voranzutreiben und der mitteleuropäische Tunnelbauer wünscht sich ein ähnliches Umfeld für Innovationen im Spritzbetontunnelbau auch bei uns und in anderen Teilen der Welt. Das interkulturelle Umfeld in Großbritannien hat es möglich gemacht, die bei jedem Tunnelprojekt vorhandenen Risiken fair mit allen Partnern zu teilen. Das heißt nicht, dass in Großbritannien höhere Risiken akzeptiert werden sondern im Gegenteil, es werden dort Risiken erfasst, evaluiert, als Management-Aufgabe behandelt und in einer „No-Blame-Culture“ werden Projekte in Partnerschaft erfolgreich abgewickelt.

Die nächsten Entwicklungen werden zeigen, ob eine permanente Spritzbetonschale ohne Isolierungslage unter Tunnelbaubedingungen wasserdicht herstellbar ist.

Die Autoren sind überzeugt, dass die UltraShell mit Verwendung von HPFRCC alleine oder in Kombination mit Textilbewehrung hervorragende Möglichkeiten für Sonderanwendungen im weltweiten Tunnelbau der Zukunft bietet.

## 6. Literatur

- [1] Müller-Salzburg, L.:  
Der Felsbau. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 1978.
- [2] Brux, G.:  
Taschenbuch für den Tunnelbau 2008, Verlag Glückauf GmbH. Essen, 2008.
- [3] Dimmock, R.; Melbye T.:  
How to achieve durable sprayed concrete linings. World Tunnelling September 2002 , Seite 345-35, 2002.

- [4] Health & Safety Executive:  
The Collapse of NATM tunnels at Heathrow Airport. A Report on the Investigation by the Health and Safety Executive into the Collapse of New Austrian Tunnelling Method (NATM) Tunnels at the Central Terminal area of Heathrow Airport on 20/21 October 1994. HSE books, London, 2000.
- [5] Arnold J.; Neumann C.:  
Umsetzung eines innovativen NÖT-Konzeptes. Felsbau 13 (1995) Nr. 6 , Seite 459-463, 1995.
- [6] Page, M.:  
NATM goes ahead on Heathrow Baggage Transfer Tunnel. (July 1995). Tunnels & Tunnelling July 1995, Seite 17-18, 1995.
- [7] Arnold, J.; Myers A.G.; Neumann C.:  
Mechanisierung der Neuen Österreichischen Tunnelbauweise beim „North Downs Tunnel“ des „Channel Tunnel Rail Link“ in England. Tagungsband Österreichischer Tunneltag 2000; Österreichisches Nationalkomitee der ITA, Salzburg – 11. Oktober 2000
- [8] Kusterle, W.:  
Performance Prediction for Sprayed Concrete used in the North Downs Tunnel. Technical Report, University Innsbruck, 2000, unpublished.
- [9] Kusterle, W.:  
Durability of Sprayed Concrete Heathrow T 5 SCL Works. Technical Report University Innsbruck, 2003, unpublished.
- [10] Zeidler, K; Jäger, J.:  
Fiber Reinforced Shotcrete for Tunnel Linings. The First International Conference on Recent Advances in Concrete Technology. Washington DC, USA. 2007.
- [11] Williams, I.; Neumann, C.; Jäger J.; Falkner L.:  
Innovativer Spritzbeton-Tunnelbau für den neuen Flughafenterminal T5 in London (Innovative Shotcrete Tunnelling for London Heathrow´s new Terminal 5). Tagungsband Österreichisches Nationalkomitee der ITA, Österreichischer Tunneltag 2004, Salzburg 2004.
- [12] Li, V.C. Wu, C.; W, S.; Ogawa, A.; Saito, T.:  
Interface Tailoring for Strain-Hardening Polyvinyl Alkohol-Engineered Cementitious Composite (PVA-ECC). ACI Materials Journal, September-October 2002.
- [13] Li, V.C.:  
Large Volume, High-Performance Application of Fibers in Civil Engineering. Journal of Applied Polymer Sciences, Vol 83, 2002.
- [14] Kim, Y.Y.; Fischer, G.; Lim, Y.M.; Li, V.C.:  
Mechanical Performance of Sprayed Engineered Cementitious Composite Using Wet-Mix Shotcreting Process for Repair Applications. ACI Materials Journal, January-February 2004.
- [15] Li, V.C.; Fischer, G.:  
Reinforced ECC – An Evaluation from Materials to Structures. Proceedings of the 1<sup>st</sup> fib Congress, Osaka, 2002.
- [16] Schmitt, F.; Hilgart, M.; Kusterle, W.:  
Investigations on fibre-reinforced composites as final lining for the UltraShell. Technical Report, 2007, unpublished.
- [17] Haller, S.; Slama, L.; Kusterle, W.:  
UltraShell – Mixes with Low Modulus of Elasticity. Technical Report, 2008, unpublished.
- [18] Lackner, R.; Pichler, Ch.; Mang, H.A.:  
Thermochemomechanics of Cement-based Materials at Finer Scales of Observation: Application to Hybrid Analyses of Shotcrete Tunnel Linings. In: Ibrahimbegovic, A.; Brank, B. (Eds.): Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Multi-physics and Multi-scale Computer Models in Non-linear Analysis and Optimal Design of Engineering Structures under Extreme Conditions. Faculty of Civil and Geodetic Engineering of University of Ljubljana, ISBN: 961-6167-60-x, S. 170 – 199; 2004.
- [19] Rokahr, R.B; Lux K.H.:  
Einfluss des rheologischen Verhaltens des Spritzbetons auf den Ausbauwiderstand. Felsbau 5 (1987) Nr.1 pp 11-18; 1987.
- [20] Schikora, K.; Ostermeier, B.:  
Temporäre Sicherung von Tunneln mit Spritzbeton. Bauingenieur 63 pp 399-403; 1988.
- [21] Österreichische Vereinigung für Beton-und Bautechnik:  
Richtlinie Spritzbeton (Ausgabe 2004).

- [22] Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik:  
Richtlinie Faserbeton (Ausgabe 2002).
- [23] Pircher, J.:  
Einschalige Tunnelbauweise-Bewertung der Tragfähigkeit von Verbundschalen. Univ. Innsbruck,  
Diplomarbeit; 2004,
- [24] Kützing, L; G; König, G.:  
Design Principals for Steel Fibre Reinforced Concrete - A Fracture Mechanics Approach, LACER  
No. 4, 1999.
- [25] Pötter, R.; Schweiger, H.F.:  
Über die Notwendigkeit der Innenschale und den Sicherheitsbegriff im Tunnelbau. Tagungsband  
Spritzbeton-Technologie 1999.
- [26] [www.zace.com](http://www.zace.com)
- [27] Bažant, Z.P.:  
Scaling of Structural Strength. London: Hermes Penton Science (2002).

**CombiShell™**, **LaserShell™**, **TunnelBeamer™** und **UltraShell™** sind Trademarks der Firmen Beton- und Monierbau und Morgan=Est. Der **TunnelBeamer™** ist ein Patent der Firmen Beton- und Monierbau und Morgan=Est.

## Die Autoren

FREng BSc CEng FICE Colin Eddie,  
Firma Morgan=Est [www.morganest.com](http://www.morganest.com) / Underground Professional Services [www.unps.co.uk](http://www.unps.co.uk)  
Technischer Direktor.  
*Colin.Eddie@MorganEst.com*

Ing. Christian Neumann,  
Studium HTL Innsbruck (Tiefbau, Abschluss 1968) und 1969 bis 1972 Bauingenieurwesen an der  
Universität Innsbruck. Tunnelbauer seit 1973 als Tunnelbauleiter und Projektleiter mit Schwerpunkt  
Auslandsbau. Firma Beton- und Monierbau, [www.BeMo.net](http://www.BeMo.net); Division-Manager für den Bereich  
Großbritannien und USA und weltweit für den Bereich Know-how Transfer.  
*Christian.Neumann@BeMo.co.at*

Dipl.-Ing. Dr. techn. Johannes Jäger,  
Studium Bauingenieurwesen an der Universität Innsbruck, Firma Beton- und Monierbau,  
[www.BeMo.net](http://www.BeMo.net); Division Manager/Leiter des Technischen Büros der Beton- und Monierbau.  
*Johannes.Jaeger@BeMo.co.at*