

---

# TUNNELAUSKLEIDUNG AUS GESCHLIFFENEM WEISSEN SPRITZMÖRTEL

---

## *TUNNEL LINING MADE OF GROUND WHITE SHOTCRETE*

Mag. (FH) Dipl.-Ing. Dr. techn. Stefan **Krispel**,  
Forschungsinstitut der Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie, Wien, Österreich

Unzureichende Sicht und dunkle Wände sind häufige Ursachen von Unfällen in Straßentunneln. So werden in den letzten Jahrzehnten Tunnel mit einem hellen Tunnelanstrich versehen, der in relativ kurzen Zeitabständen, manchmal bereits nach rund zehn Jahren, nicht selten aber auch schon früher aufwändig erneuert werden muss. Je nach Grad der Untergrundschiädigung sind Folgesanierungen etwa alle drei bis fünf Jahre zu wiederholen. Oftmalige und längere Tunnelsperren bzw. Teilsperren erhöhen demgemäß nicht nur das Unfallrisiko für die Verkehrsteilnehmer sondern auch die Kosten (z.B. Tunnelbeleuchtung, Staukosten, Mautentfall). Im nachstehenden Beitrag wird eine alternative dauerhafte Instandsetzungsmethode mit geschliffenem weißem Spritzmörtel vorgestellt, die alle Anforderungen an die Oberfläche der Tunnelinnenschale erfüllt.

*Insufficient visibility and dark walls often have caused accidents in road tunnels. Therefore during the last decades tunnels got a bright paint finish, which makes expensive renewal necessary after comparatively short intervals, sometimes already after ten years, in many cases even earlier. Depending on the degree of damage done to the substrate, subsequent repairs have to be carried out every three to five years. Frequent and long-time blocking of tunnels or partial closures not only raise accident risks for the road users, but costs as well (e.g. tunnel lighting, costs caused by tailback, loss of road charges). The following article gives a summary of an alternative method of long-lasting maintenance with the help of ground white shotcrete, which fulfils all requirements on the surface of the inner tunnel shell.*

### 1. Einleitung

Zur Erzielung der geforderten Oberflächeneigenschaften wie z. B. Reinigungsfähigkeit, Helligkeit, glatte Oberfläche und Reflexion/Glanzgrad von Tunnelinnenschalen, Unterflurtrassen, Straßenunterführungen und Galerien werden derzeit in Österreich hauptsächlich Anstrich- bzw. Beschichtungssysteme verwendet. Die im Straßentunnelbau eingesetzten Anstrichsysteme bestehen grundsätzlich aus zwei Schichten (Spachtelung und Tunnelanstrich). Zurzeit wird im Bereich bis 2 m Höhe ab Gehwegoberkante eine Epoxy-Spachtelung mit einer Schichtdicke von 2 mm und ein Tunnelanstrich mit einer Schichtdicke von 200 µm hergestellt. Im Bereich über 2 m Höhe wird anstelle der vollflächigen Epoxy-Spachtelung eine Kratz- und Lunkerspachtelung ausgeführt [1].

Als Tunnelanstriche werden überwiegend Zweikomponenten-Epoxidharze eingesetzt, die vollflächig mit einer Mindestschichtdicke (Trockenfilm) von 200 µm aufgetragen werden [1]. Die fertige Oberfläche muss einen glatten, weitgehend geschlossenen Anstrichfilm aufweisen und frei von Tropfen bzw. ablaufenden Tropfenspuren sein. Im Überlappungsbereich von Anstrichen kann diese Forderung bei Spritzapplikation unter tunneltypischen Verarbeitungsbedingungen nicht immer erfüllt werden [2].

In letzter Zeit traten vermehrt Schäden an Anstrichsystemen auf, teilweise schon wenige Wochen nach Verkehrsfreigabe. Hierbei kommt es oftmals zu einem Ablösen des Anstrichs. Dies führt wegen der Verminderung der Oberflächenqualität zu einer Reduzierung der Sicherheit der Verkehrsteilnehmer. Durch das Auftreten dieser Schäden hat bereits kurze Zeit nach Fertigstellung der Arbeiten eine erneute Sperre des Tunnelbauwerkes zu erfolgen, um die notwendigen Instandsetzungsmaßnahmen zu treffen. Bild 1 zeigt ein typisches Schadensbild. Weitere Schadensbilder sind beispielsweise Rissbildungen aber auch Absprengen von Mörtelteilen in bereits instand gesetzten Bereichen.



*Bild 1: Typisches Schadensbild (Fotos ASFINAG / VÖZfi)*

Instandsetzungsarbeiten sind zeitaufwendig und teuer, weil [2]:

- die Altbeschichtungen bzw. schadhaften Beschichtungs-/Anstrichsysteme entfernt werden müssen,
- der unterhalb der Beschichtung befindliche Beton bis zum nicht geschädigten Bereich abgetragen werden muss und
- eine neuerliche Beschichtung aufgetragen werden muss.

Darüber hinaus kann die Dauerhaftigkeit der wiederholten Instandsetzung nicht immer gewährleistet werden. Aus diesen Gründen wurden alternative Lösungswege mit mineralischen Materialien, welche eine höhere Dauerhaftigkeit als herkömmliche Anstrichsysteme aufweisen, gesucht [2].

## **2. Ziel, Inhalt und Abwicklung des Forschungsvorhabens**

Ziel des von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) unterstützten Forschungsvorhabens war die Entwicklung eines Verfahrens zur Herstellung von Tunnelauskleidungen aus geschliffenen weißen Spritzmörtelschichten<sup>1</sup>. Diese Tunnelauskleidung sollte im geschliffenen Zustand ohne zusätzliche Anstriche und/oder Beschichtungen die in Österreich gültigen Anforderungen des ÖVBB-Merkblattes „Anstriche für Tunnelinnenschalen“ [1] und der RVS 09.01.23 [3] bzw. RVS 09.01.43 [4] erfüllen. Ausführende des

<sup>1</sup> Die Begriffe Spritzmörtel und Spritzbeton werden in der vorliegenden Veröffentlichung als gleichwertig angesehen bzw. verwendet.

Projektes waren das Forschungsinstitut der Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie (VÖZfi) für die Untersuchungen am frischen und am erhärteten Spritzmörtel und die H. Junger BaugesmbH für die maschinentechnischen Entwicklungen und die Praxisumsetzung.

Zur Erreichung des o. a. Ziels musste neben der Entwicklung adäquater Spritzmörtelrezepturen ein eigenes Herstellverfahren für die neue Tunneloberfläche entwickelt werden.

Der erste Teil der Arbeiten umfasste die Auswahl von geeigneten Ausgangsstoffen zur Erstellung einer adäquaten Spritzmörtelzusammensetzung und der zweite Teil des Forschungsvorhabens behandelte die Praxisumsetzung der laut Vorversuchen erfolgversprechenden Varianten. Für diesen zweiten Teil wurde von der H. Junger BaugesmbH die maschinentechnische Entwicklung durchgeführt, welche die Erzielung einer glatten, mattglänzenden Oberfläche ermöglichte [2].

### 2.1. Betontechnische Untersuchungen

Es wurden mehrere Spritzmörtelzusammensetzungen praxisnah beurteilt. Neben den Untersuchungen am Spritzmörtel wurden weiters die Ausgangsstoffe des Mörtels hinsichtlich ihrer Eignung für die zu entwickelnde Anwendung einer Beurteilung unterzogen. Die Mischgutzusammenstellung erfolgte durch die Fa. Betontechnik GmbH im Auftrag der Wietersdorfer & Peggauer Zementwerke GmbH.

Die Gesteinskörnungsanalysen umfassten die Bestimmung der Kornrohddichte gemäß ÖNORM B 3303 [5], der Kornzusammensetzung gemäß ÖNORM EN 933-1 [6], des Karbonatanteils (CO<sub>2</sub>-Gehalts) nach ÖNORM EN 196-2 [7] und die Untersuchung der Mehlkorneigenschaften mittels FPIA-Gerät (Flow Particle Image Analyzer; Verfahren VÖZfi).

Die Untersuchungen der verwendeten Bindemittel umfassten die Bestimmung der Normenfestigkeiten gemäß ÖNORM EN 196-1 [8], des Erstarrungsverhaltens gemäß ÖNORM EN 196-3 [9], der Dichte gemäß ASTM C 188-95 mittels Le Chatelier [10], der spezifischen Oberfläche nach Blaine gemäß ÖNORM EN 196-6 [11] und die Untersuchung der Mehlkorneigenschaften mittels FPIA-Gerät [2].

Bild 2 zeigt exemplarisch eine Kornanalyse einer Gesteinskörnung durchgeführt mittels FPIA. Mit diesem Verfahren werden, neben der Beurteilung der Sieblinie im Mehlkornbereich, u. a. die Kornparameter Kornindex und Rauhigkeit beurteilt.

Der Kornindex stellt das Verhältnis von Kornlänge zu Korndicke dar und ist eine wesentliche Einflussgröße für das erforderliche Mehlkorn. Gute mehlfeine Stoffe dürfen einen mittleren Kornindex  $< 1,4$  mit einer Standardabweichung von maximal 0,20 aufweisen.

Die Rauhigkeit beschreibt das Verhältnis von Kornumfang zu Umhüllende (Kornumfang, der durch ein um das Korn angeschmiegttes imaginäres „Gummiband“ abgebildet ist) [12].

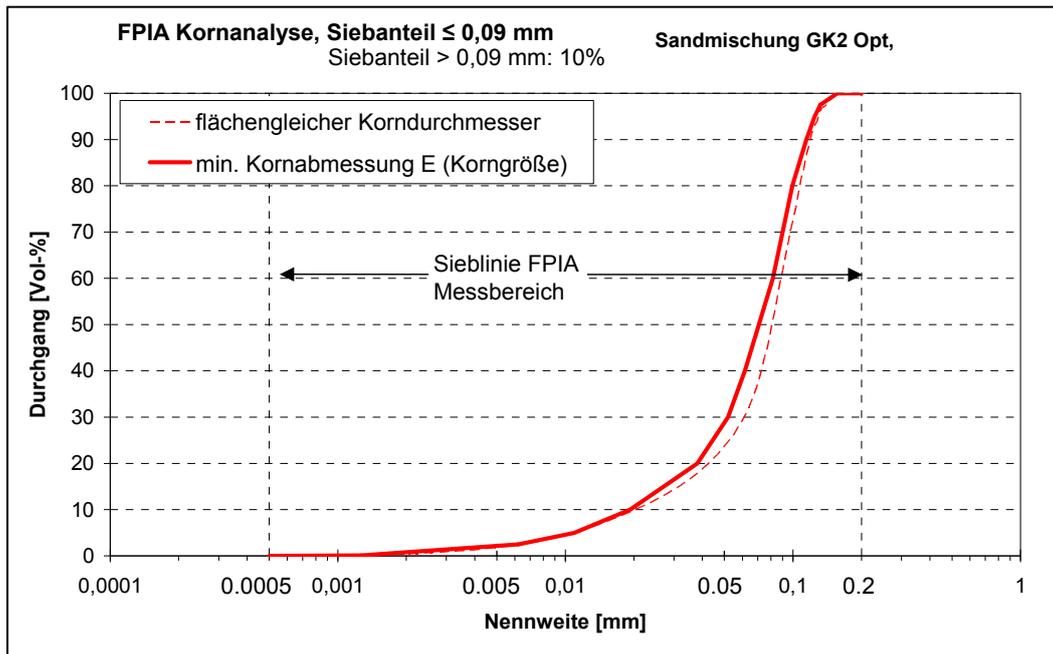


Bild 2: Sieblinie ermittelt mittels FPIA

Die Korneigenschaften des Mehlkorns beeinflussen die Verarbeitbarkeit von Beton wesentlich. Insbesondere kann durch die Auswahl von Bestandteilen mit optimierten Korneigenschaften Normalbeton mit hoher Packungsdichte und demgemäß verbesserten Betoneigenschaften hergestellt werden [12].

Im Bild 3 ist Mehlkorn unterschiedlicher Qualität dargestellt.

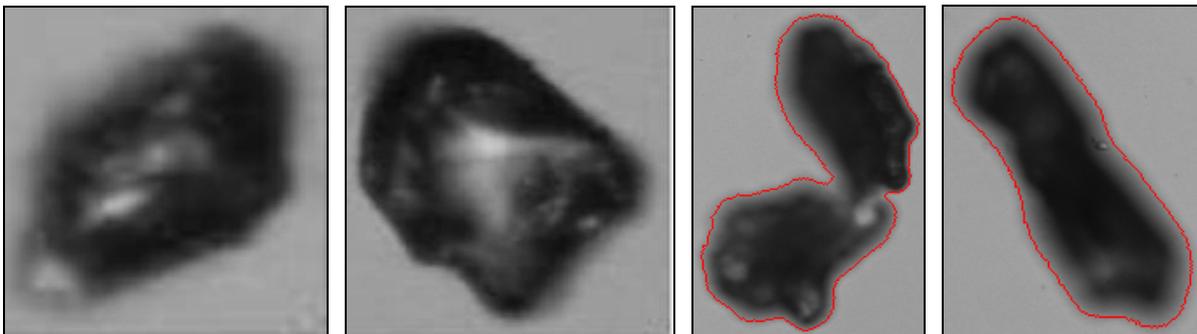


Bild 3: Mehlkorn unterschiedlicher Qualität (Fotos VÖZfi)

Die Auswahl besonders heller Ausgangsstoffe (Gesteinskörnungen und Bindemittel) war von großer Bedeutung zur Erreichung der geforderten Helligkeitseigenschaften. Die Beurteilung der Helligkeitseigenschaften erfolgte mittels Bestimmung des Hellbezugswertes [2]. Bild 4 zeigt die Bestimmung des Hellbezugswertes und den zur Beurteilung herangezogenen HSL-Farbraum.

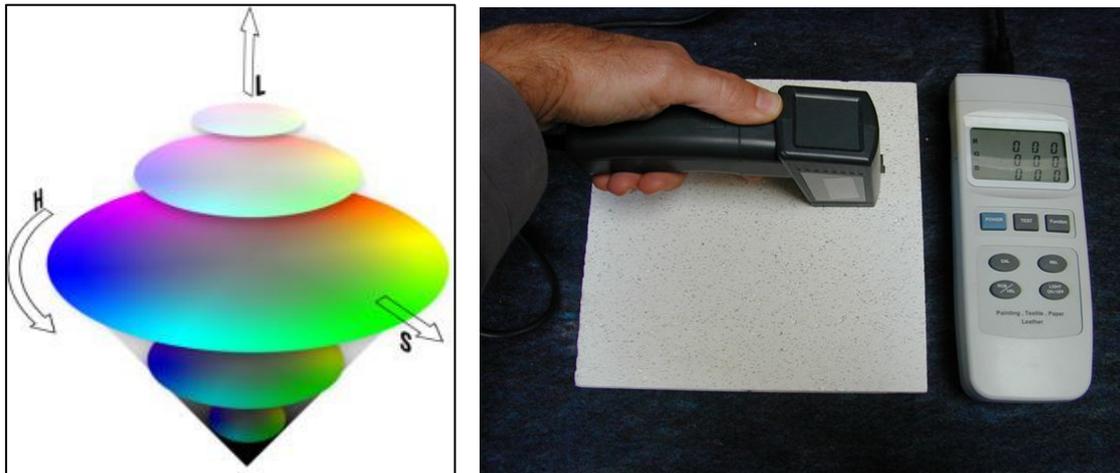


Bild 4: HSL-Farbraum und Bestimmung des Hellbezugswertes (Foto VÖZfi)

Der Hellbezugswert ist das wesentliche Kriterium hinsichtlich der lichttechnischen Kennwerte (Anforderung  $q_0$ -Wert gemäß RVS 09.02.41 [13]). Auch für das subjektive Sicherheitsgefühl der Verkehrsteilnehmer ist er maßgebend. Bild 5 zeigt den Messaufbau der Bestimmung der vollständigen Reflexionscharakteristik gemäß CIE 30-2. Der Messaufbau beinhaltet die Bestimmung aller 396 Einzelwerte der Leuchtdichtekoeffizienten  $q$  im Bereich der Anleuchtungsgeometrie  $\beta = 0^\circ \dots 180^\circ$  und  $\gamma = 0^\circ \dots 85,2^\circ$  [14].

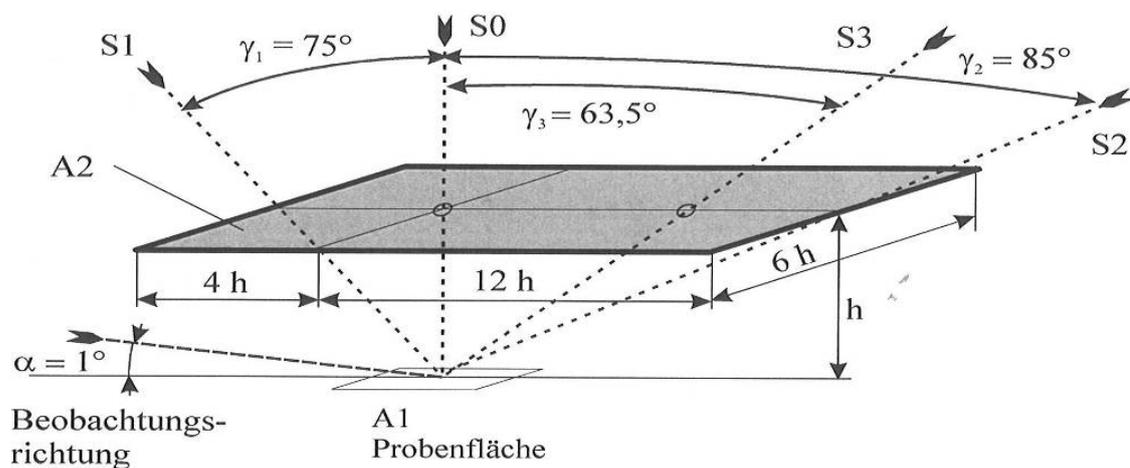


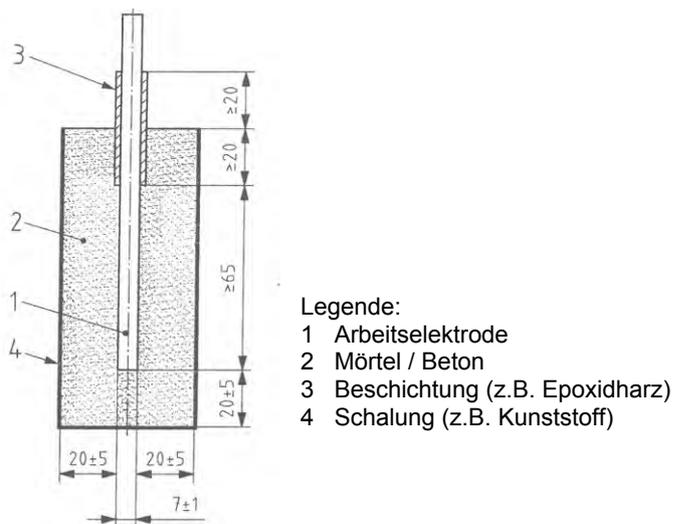
Bild 5: Messaufbau zur Bestimmung der Reflexionscharakteristik

Zur Auswahl der Spritzmörtelrezepturen wurden Vorversuche (Spritzversuche) durchgeführt. Jene Zusammensetzungen, die sich bei den Spritzversuchen gut verarbeitbar zeigten, wurden für die weiteren Untersuchungen im Labor herangezogen [2].

Am frischen Spritzmörtel wurde im Labor des VÖZfi die Bestimmung des Ausbreitmaßes, des Luftgehaltes, der Rohdichte und des Wassergehaltes gemäß ÖNORM B 3303 [5] sowie die Bestimmung der Verarbeitbarkeit mittels Betonrheometer durchgeführt [2]. Weiters erfolgte eine Beurteilung der Stabilität (Wasserumlagerung) der jeweiligen Rezeptur mittels Druckpressversuch<sup>2</sup> [15].

Am Festbeton erfolgte die Bestimmung der Festigkeitsentwicklung (1, 2, 3 und 28 Tage), der LP-Kennwerte inkl. des Zeitpunktes der Schleifbarkeit und der gleichwertigen Beständigkeit für die Frostklasse XF4 gemäß ÖNORM B 3303 [5]. Um die Gleichwertigkeit mit üblichen Konstruktionsbetonen nachzuweisen, wurden weiters Bestimmungen der Chloriddiffusion (Ermittlung der Diffusionskoeffizienten) durchgeführt [2]. Dies erfolgte in Anlehnung an ÖNORM EN 480-14 [17]. Abweichend zur normativen Vorgabe wurde die Prüfung nicht nach Abschluss des 24-stündigen Prüfzeitraums abgebrochen, sondern bis zum Eintreten der Lochfraßkorrosion fortgesetzt [2].

Bild 6 zeigt einerseits schematisch die Prüfanordnung und andererseits einen Prüfkörper nach Prüfungsdurchführung. Aus dem sprunghaften Stromanstieg bei Einsetzen der Lochfraßkorrosion am Stahl wurde die Durchbruchzeit<sup>3</sup> ermittelt, mit deren Hilfe der Diffusionskoeffizient errechnet wurde [18].



*Bild 6: Prüfanordnung und Prüfkörper nach Prüfungsdurchführung (Foto VÖZfi)*

<sup>2</sup> Beim Druckpressversuch wird i. A. ein definierter Druck von 3 bar auf den Frischbeton über einen Zeitraum von 15 Minuten aufgebracht. Nach Prüfende wird der Deckel des Druckpresstopfes abgenommen und der Wassergehalt des Betons in der oberflächennahen Schicht durch Trocknen geprüft. Je größer die Zunahme des Wassergehalts in der oberflächennahen Schicht ist, umso geringer ist die Stabilität des Betons.

<sup>3</sup> Durchbruchzeit: Zeitdauer bis das Chlorid durch die Mörtелеlektrode bis zur Stahlelektrode in Probenmitte diffundiert.

Zur Vermeidung von Schwindrissen an der Oberfläche der neuen Tunnelauskleidung hatte der applizierte Spritzmörtel das Schwindmaß gemäß ÖVBB-Richtlinie „Erhaltung und Instandsetzung von Betonbauwerken“ [16] einzuhalten. Die Einhaltung dieser Vorgabe ist für die Anwendung von bestimmten Instandsetzungsprodukten vorgeschrieben [16]. Zusätzlich zu dieser Referenzbestimmung nach ÖVBB-Richtlinie erfolgte die Bestimmung des Schwindens mit längerem Feuchthalten der Probekörper analog der Feuchteverhältnisse in Tunnelbauwerken. Nach dem Ausschalen im Alter von 24 Stunden wurden die Prismen mit Folie umwickelt und bis zum Alter von 7 Tagen gelagert. Die anschließende Lagerung erfolgte bei max. 60 % r. F. und  $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$  Umgebungsbedingungen [2].

Die Simulation des Straßenbetriebeeinflusses erfolgte durch Reinigungsversuche der Probestplatten (zyklisches Aufbringen einer künstlichen Verschmutzung aus Russ-Öl-Wasser-Gemisch und Reinigen mittels Tunnelreinigungsmittel und Wasser). Bild 7 zeigt die Herstellung der künstlichen Verschmutzung. Um möglichst realitätsnahe Vorgänge zu simulieren, wurde die Reinigung mittels Hochdruckreiniger (etwa 90 – 100 bar) und händischem Bürsten durchgeführt. Nach Angaben des Infrastrukturbetreibers stellt dies eine adäquate Simulation des Tunnelreinigungsvorgangs dar [2].



*Bild 7: Herstellung der künstlichen Verschmutzung (Foto VÖZfi)*

Die Bezugsmessung einer jeden Versuchsreihe wurde im trockenen, unverschmutzten Plattenzustand (Abnahmezustand des Tunnelbauwerks) durchgeführt. Eine weitere Bestimmung erfolgte im nassen, unverschmutzten Zustand zur Beurteilung des Einflusses einer feuchten Oberfläche. Weitere Bestimmungen wurden nach ein, zwei und drei Verschmutzungs- und Reinigungszyklen durchgeführt.

Nach jeder Reinigung wurde die Platte luftgetrocknet und anschließend wieder künstlich verschmutzt, die weitere Reinigung erfolgte erst nachdem die wieder aufgebrachte Verschmutzung getrocknet war. Bis zur Bestimmung der Hellbezugswerte lagerten die Probekörper luftdicht verpackt. Bild 8 zeigt die Reinigung der Probekörper [2]. Die Prüfungen erfolgten an imprägnierten und nicht imprägnierten Platten.



*Bilder 8: Reinigung der Probekörper (Fotos VÖZfi)*

## 2.2. Spritzapplikation

Zur Beurteilung der Spritzapplikation wurde am Werksgelände der Fa. H. Junger ein Versuchstunnel errichtet. Ziel dieser Versuche war, neben der Beurteilung der Verarbeitbarkeit, die Bestimmung der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse vor Ort unter Einsatz von maschinellen Applikationsgerätschaften und die Bestimmung relevanter Kennwerte an aus dem Versuchstunnel entnommenen Probekörpern.

Die Untergrundvorbereitung der Betonoberfläche (Trägerbeton) der Tunnelinnenseite des Versuchstunnels erfolgte durch Höchstdruckwasserstrahlen, um die in der ÖVBB-Richtlinie „Erhaltung und Instandsetzung von Betonbauwerken“ [16] gestellten Oberflächenanforderungen zu erfüllen. Diese richtlinienkonforme Untergrundvorbereitung ist für die Simulation von Instandsetzungsmaßnahmen unter Baustellenbedingungen wesentlich [2].

Zusätzlich wurden eine Vielzahl an Betonplatten (Abmessungen etwa 2 x 1 x 0,25 m) hergestellt und diese sowohl horizontal als auch vertikal mit dem Spritzmörtel belegt. Diese Platten wurden für erste Tastversuche zur Erstellung bzw. Einstellung des Schleifgerätes.

Bild 9 zeigt den Versuchstunnel in Irdning/Steiermark. Zur Beurteilung der Gleichmäßigkeit der Spritzmörtel wurden je Zusammensetzung mehrere Versuche durchgeführt.



Bild 9: Versuchstunnel (Foto Junger)

Im Zuge der Spritzapplikationen wurden mehrere Parameter beurteilt um die geeignete Zusammensetzung des Spritzmörtels feststellen zu können. Tabelle 1 zeigt exemplarisch das Beurteilungsschema einer Spritzmörtelzusammensetzung.

Tab. 1: Beurteilungsschema

| Anforderung  | Ergebnis                               | Bemerkungen   |
|--|--|---|
| Auftragfähigkeit, Erzielung eines homogenen, dichten Spritzbetongefüges und einer geschlossenen Oberfläche | Gegeben                                | Vorhandene Witterung: Heiter bis bedeckt, Temperatur 10 Uhr: 13 °C<br>Temperatur 12 Uhr: 16 °C<br>Temperatur Bauwerkoberfläche bei Auftrag: 11,7 °C |
| Auftrag in einer Lage  | Möglich <sup>2)</sup>                  | Schichtstärke 1,5 cm;   |
| Förderung des Mischgutes – Einfluss auf Verschleiß der Pumpgerätschaften                                   | Keine negativen Auswirkungen vorhanden | Verwendetes Gerät: Mai 200 mit Reprofilierdüse  |
| Abziehbarkeit des aufgetragenen Spritzbetons am Bauwerk  | Gut                                    | Oberfläche gleichmäßig und geschlossen herstellbar  |
| Glättfähigkeit des aufgetragenen Spritzbetons am Bauwerk   | Gut                                    | Oberfläche gleichmäßig geschlossen und glatt herstellbar <sup>1)</sup>  |

1) Nachglätten etwa 1,5 Stunden nach Auftrag möglich, keine Rissbildung beim Glätten (letzte Unebenheiten gut entfernbar)

2) Keine ausgeprägten Verdrückungen feststellbar

Im Zuge dieser Applikationsversuche wurden begleitende betontechnische Untersuchungen (Frisch- und Festbeton) an den vor Ort hergestellten Spritzmörteln durchgeführt, um die Reproduzierbarkeit der verwendeten Zusammensetzungen beurteilen und die Ergebnisse mit jenen aus den Laborversuchen vergleichen zu können. Zur Beurteilung des Einflusses der Oberflächenrauheit bzw. -unebenheiten auf das maschinelle Schleifen wurden einzelne Flächen nur abgezogen, andere hingegen abgezogen und geglättet [2].

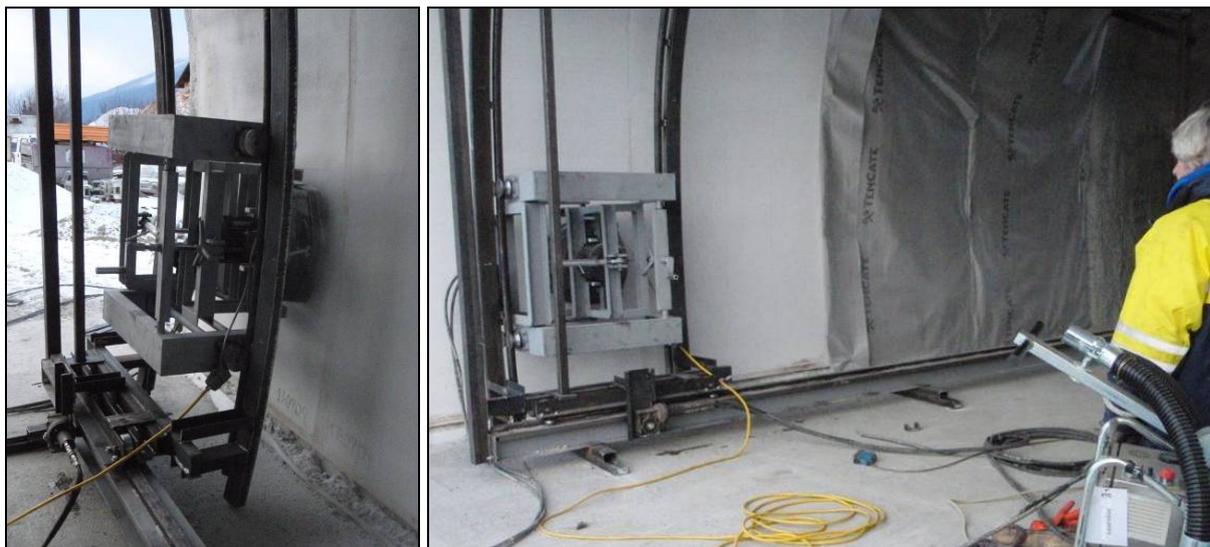
### 2.3. Maschinenteknik

Ziel war die Entwicklung eines Schleifverfahrens für Tunneloberflächen, welches großflächig bei aufgebrachtem Spritzmörtel eingesetzt werden kann und eine wirtschaftliche Alternative zu Anstrichen bzw. Beschichtungen bietet. Wesentliche, zu beantwortende Fragestellungen waren die Art der Schleifvorgänge und die Anzahl der Übergänge, welche erforderlich sind, um die geforderten Oberflächeneigenschaften zu erhalten. Dies erfolgte parallel zu den betontechnologischen Untersuchungen und Festlegungen (z.B. Schleifbarkeit, Festigkeitsentwicklung) [2].

Durch die gewählte Gerätetechnik ist es möglich die unterschiedlichen Oberflächengeometrien von Tunnelobjekten mit gewölbten Innenschalen gleichmäßig zu bearbeiten und eine glatte, kantenfrei geschliffene Oberfläche herzustellen.

Für die Durchführung der Tests am Versuchstunnel wurde ein Schienensystem an der Tunnelulme befestigt, und darauf die komplette Schleifausstattung inklusive Steuerung montiert. Für die Praxisumsetzung wird die gesamte Ausstattung (Antrieb, Steuerung, etc.) auf einem fahrbaren Unterbau aufgebaut. Die Steuerung erfolgt elektrohydraulisch, die Bedienung erfolgt mittels Fernsteuerung. Damit werden der nötige Anpressdruck und die erforderliche Steuergenauigkeit sichergestellt [2].

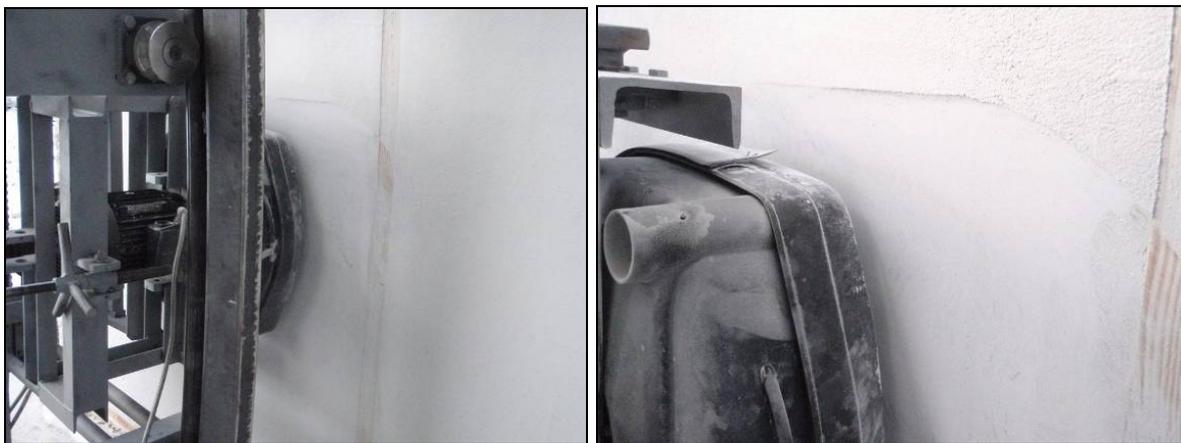
Bild 10 stellt die Trägerkonstruktion und den Schleifkopf im Einsatz am Versuchstunnel dar.



*Bild 10: Trägerkonstruktion und Schleifkopf (Fotos Junger)*

Die Art der Vorbehandlung (reines Abziehen der Oberfläche oder Abziehen und Glätten) ergab keinen Einfluss auf die Eigenschaften der fertig gestellten Oberfläche. Ein Glätten der abgezogenen Fläche wirkt sich negativ auf den Schleifvorgang aus, da beim Glätten eine Feinteilanreicherung an der Oberfläche entsteht. Diese Feinteilanreicherung muss abgeschliffen werden, da zur Oberflächenwirkung die größeren Kornfraktionen freigelegt werden müssen. Dies bedeutet weiters, dass durch den Wegfall des Glättens ein beträchtliches Einsparungspotential vorhanden ist, da das Glätten im Gegensatz zum Abziehen sehr zeit- und damit kostenintensiv ist [2]. Nach dem Schleifen soll der Auftrag einer Imprägnierung zur Erhöhung der Reinigungsfähigkeit erfolgen.

In Bild 11 ist deutlich der Übergang vom geschliffenen zum noch nicht geschliffenen Oberflächenbereich sichtbar.



*Bild 11: Geschliffene Oberfläche (Foto Junger)*

Bild 12 zeigt den entwickelten fahrbaren Unterbau beim ersten Praxiseinsatz des neuen Instandsetzungssystems an einem Tunnelbauwerk an der Bundesstraße B146.



*Bild 12: Praxiseinsatz (Foto VÖZfi)*

### 3. Ergebnisse

Wesentliche Frisch- und Festbetonkennwerte sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Tabelle 3 zeigt den Widerstand gegen Chloriddiffusion. Exemplarisch werden die Ergebnisse für Spritzmörtel mit Größtkorn 2 mm präsentiert.

Tab. 2: Wesentliche Frisch- und Festbetonkennwerte

| Prüfung / Kennwert   | Spritzmörtel GK2            |           |           |           |
|--|-----------------------------|-----------|-----------|-----------|
|  | Versuch 1                   | Versuch 2 | Versuch 3 | Versuch 4 |
| Wasseranreicherung [%]   | Wasseranreicherung max. 1 % |           |           |           |
| Schwindmaß nach 90 Tagen [‰] <sup>1)</sup>                           | Schwindmaß ≤ 1,2 ‰          |           |           |           |
| Schwindmaß nach 90 Tagen [‰] <sup>2)</sup>                           | Schwindmaß ≤ 1,2 ‰          |           |           |           |
| Gleichwertige Beständigkeit XF4<br>Abwitterungen [g/m <sup>2</sup> ] | 3                           | 5         | 7         | 5         |
| Schleifbarkeit [h] <sup>3)</sup>                                     | 45                          | 45        | 43        | 42        |

1) Referenzbestimmung

2) Simulation unter Tunnelbedingungen

3) Lagerung bei 10 °C

Tabelle 2 zeigt die geringe Versuchsstreuung der Prüfergebnisse und demgemäß die Gleichmäßigkeit der Spritzmörtelherstellung. Die gestellten Anforderungen wurden bei allen Versuchsreihen erfüllt.

Die Beständigkeit für die Frostklasse XF4 ist für den beabsichtigten Anwendungsbereich erforderlich, da insbesondere an den Tunnelportalen erhöhte Streumittelbelastungen zu erwarten sind. In Bild 13 sind einerseits die Summenlinie der Abwitterungen und andererseits das Erscheinungsbild des Prüfbetons nach 56 FT-Wechseln dargestellt. Es ist deutlich erkennbar, dass nahezu keine Abwitterungen die Oberfläche des Prüfkörpers beeinträchtigt haben.

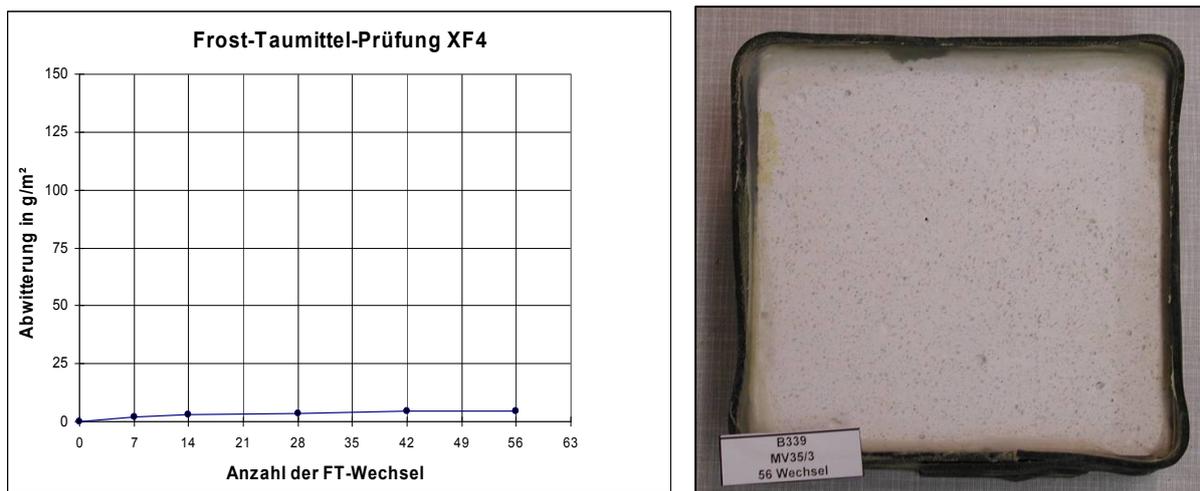


Bild 13: Gleichwertige Beständigkeit für die Frostklasse XF4

Von großer Bedeutung für die Gleichwertigkeit mit üblichen Konstruktionsbetonen und damit ein Indikator für die Beständigkeit des Tunnelbauwerks ist das Ergebnis der Chlorid-

diffusionsbestimmungen. Für Tunnelinnenschalenbeton IGT (Frostangriff mit Taumittel ohne Tunnelanstrich) gilt ein W/B-Wert (Zielwert) von  $\leq 0,50$  [20]. Ein W/B-Wert (Zielwert) von  $\leq 0,63$  ist bei Tunnelinnenschalenbeton IGP/ISP (Frostangriff ohne Taumittel bzw. mit Tunnelanstrich) einzuhalten [20]. Zum Vergleich wurde ein Referenzmörtel mit einem W/B-Wert von 0,50 und ein Referenzbeton mit einem W/B-Wert von 0,55 geprüft [2].

Tab. 3: Chloriddiffusionsbestimmungen

|  | Durchbruchzeit $t$ [Tage] | Diffusionskoeffizient $D_{EW}$ <sup>2)</sup><br>[cm <sup>2</sup> /sec] |
|--|---------------------------|--|
| Referenzmörtel<br>(W/B-Wert : 0,50)              | 57                        | $4,1 \cdot 10^{-8}$  |
| Referenzbeton<br>(W/B-Wert : 0,55) <sup>1)</sup> | 52                        | $4,5 \cdot 10^{-8}$  |
| GK2 / Versuch 1 <sup>3)</sup>                    | 50                        | $4,6 \cdot 10^{-8}$  |

1) Werte entnommen aus [18, 19]

2) Mittelwert aus 2 Einzelwerten

3) Laborherstellung

Anhand der in Tabelle 3 dargelegten Ergebnissen ist die Gleichwertigkeit mit üblichen Konstruktionsbetonen ersichtlich. Die Ergebnisse der Untersuchungen an im Rahmen der Applikationsversuche vor Ort hergestellten Probekörpern konnten die Ergebnisse der Laboruntersuchungen bestätigen.

Die ermittelten Hellbezugswerte, welche für den Fahrkomfort und die notwendige Intensität der Tunnelbeleuchtung wesentlich sind, zeigen eine äußerst hohe Gleichmäßigkeit, eine hohe Schwankungsbreite kann nicht festgestellt werden.

Zusätzlich wurden Vergleichsversuche mit Probekörpern, entnommen aus dem Versuchstunnel, durchgeführt. Diese Ergebnisse stimmen sehr gut mit jenen der Probekörper, die im Labor geschliffen und imprägniert wurden, überein. Dies zeigt, dass die Laborprüfungen die Oberflächenbearbeitung (schleifen, imprägnieren) vor Ort gut simulieren. Damit kann eine adäquate Vorhersage der Ergebnisse von Prüfungen vor Ort (z.B. Abnahmeprüfung des Hellbezugswertes) getroffen werden. Zusätzlich wurden an ausgewählten Probekörpern, ergänzend zu den Hellbezugswertbestimmungen, die lichttechnischen Kennwerte in einem Labor für Lichttechnik bestimmt. Die Anforderung des  $q_0$ -Wertes von  $0,20 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$  gemäß RVS 09.02.41 [13], welche die Vorgabe des Infrastrukturbetreibers darstellt, wurde stets erfüllt [2].

#### 4. Zusammenfassung

Ein ausreichender Hellbezugswert, eine gute Reinigungsfähigkeit und eine glatte Oberfläche sind wesentliche Eigenschaften von Tunnelanstrichen. Insbesondere bei Tunnelinstandsetzungen aber auch bei Neuerrichtung von Tunnelbauwerken treten immer wieder Schadensfälle (z.B. Ablöseerscheinung) auf. Als eine mögliche Lösung bietet sich eine zementgebundene, weiße Spritzmörtelschicht an, welche einerseits alle relevanten Oberflächeneigenschaften erfüllt und andererseits in ihrer Beständigkeit vergleichbar mit herkömmlichen Konstruktionsbetonen ist [2].

Bild 14 zeigt eine geschliffene Spritzmörteloberfläche im Detail.



*Bild 14: Geschliffene Oberfläche (Foto VÖZfi)*

Die Nachweisführung der geforderten Eigenschaften erfolgte stufenweise beginnend mit der Materialauswahl, der Beurteilung der Verarbeitbarkeit, den Frischbetonkennwertbestimmungen und abschließend der Ermittlung der Festbetoneigenschaften. Die gestellten Anforderungen, wie z.B. Gleichwertigkeit mit üblichen Konstruktionsbetonen aber auch eine hohe Reproduzierbarkeit und entsprechende Verarbeitbarkeit, konnte prüftechnisch belegt werden. Erste Praxisanwendungen bestätigen diese Erkenntnisse.

Parallel dazu wurde seitens der ausführenden Firma H. Junger BaugesmbH eine maschinentechnische Ausstattung entwickelt, welche den aufgetragenen Spritzmörtel mittels industriellem Fertigungsverfahren schleift.

Die Ergebnisse der Bestimmung der lichttechnischen Kennwerte erfüllen die Anforderungen des in Österreich gültigen Regelwerkes RVS 09.02.41 [13]. Die Wiederherstellung des ursprünglichen Abnahmestandes ist durch einfaches Nachschleifen möglich. Diese Tätigkeit nimmt einerseits aufgrund der Automatisierung des Schleifvorganges nicht allzu viel Zeit in Anspruch und kann andererseits mehrmals wiederholt werden. Diese Möglichkeit der mehrmaligen und raschen Wiederherstellung des Abnahmestandes ohne zeitaufwändige und teure Instandsetzungsarbeiten ist für die Verfügbarkeit des Bauwerks im Straßennetz von Vorteil.

Tunnelauskleidungen aus geschliffenen, weißen Spritzmörtelschichten stellen eine effiziente und dauerhafte Alternative zu herkömmlichen Tunnelanstrichsystemen dar, da Sanierintervalle wesentlich verlängert werden können und aufgrund der maschinellen Arbeitsausführung bzw. der geringeren Anzahl an Arbeitsschritten nur kurze Tunnelsperren erforderlich sind.

## 5. Literatur

- [1] Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik:  
ÖVBB-Merkblatt „Anstriche für Tunnelinnenschalen“. Wien, 2004.
- [2] Krispel, St.:  
Tunnelauskleidung aus geschliffener weißer Spritzmörtelschicht. Verlag Bau+Technik GmbH, beton, Heft 5/2011.
- [3] Österreichische Forschungsgesellschaft Straße, Schiene und Verkehr (FSV):  
RVS 09.01.23: Tunnel, Tunnelbau, Bauliche Gestaltung, Innenausbau. Wien, 2009.

- [4] Österreichische Forschungsgesellschaft Straße, Schiene und Verkehr (FSV): RVS 09.01.43: Tunnel, Tunnelbau, Konstruktive Ausführung, Innenschalenbeton. Wien, 2004.
- [5] ÖNORM B 3303: Betonprüfung. Wien, 2002.
- [6] ÖNORM EN 933-1: Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen, Teil 1: Bestimmung der Korngrößenverteilung - Siebverfahren (konsolidierte Fassung). Wien, 2006.
- [7] ÖNORM EN 196-2: Prüfverfahren für Zement, Teil 2: Chemische Analyse von Zement. Wien, 2005.
- [8] ÖNORM EN 196-1: Prüfverfahren für Zement, Teil 1: Bestimmung der Festigkeit. Wien, 2005.
- [9] ÖNORM EN 196-3: Prüfverfahren für Zement, Teil 3: Bestimmung der Erstarrungszeiten und der Raumbeständigkeit. Wien, 2005.
- [10] ASTM C 188-95: Bestimmung der Dichte von hydraulischem Zement (Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement). United States, 2003 (Reapproved 2003).
- [11] ÖNORM EN 196-6: Prüfverfahren für Zement, Teil 6: Bestimmung der Mahlfeinheit. Wien, 2008.
- [12] Macht, J.; Nischer, P.: Mehlkornoptimierung. Notwendigkeit und Möglichkeiten zur Ermittlung der Korngrößenverteilung, Kornform und Kornoberfläche. BFT 04/2006.
- [13] Österreichische Forschungsgesellschaft Straße, Schiene und Verkehr (FSV): RVS 09.02.41: Tunnelausrüstung, Lichttechnik, Beleuchtung. Wien, 2009.
- [14] CIE 30-2: Calculation and measurement of luminance and illuminance in road traffic. Commission Internationale de L'Eclairage. 1990.
- [15] Macht, J.; Nischer, P.: Abschlussbericht „Weiche Betone für schwierige Einbaubedingungen“, FFG-Projekt Nr. 812871, Wien, 2007.
- [16] Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik: ÖVBB-Richtlinie „Erhaltung und Instandsetzung von Bauten aus Beton und Stahlbeton“. Wien, 2007.
- [17] ÖNORM EN 480-14: Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpressmörtel – Prüfverfahren, Teil 14: Bestimmung des Korrosionsverhaltens von Stahl in Beton – elektrochemische Prüfung bei gleich bleibendem Potential. Wien, 2006.
- [18] Rechberger, P.: Diffusion von Chloriden. Bestimmung von Diffusionskoeffizienten z. B. im Hochleistungsbeton. Untersuchungsbericht P56, Forschungsinstitut der Österreichischen Zementindustrie. Wien, 1994.
- [19] Nischer, P.: Hochleistungsbeton für den Straßen- und Brückenbau, Teil I. Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten, Straßenforschung, Heft 441. Wien, 1994.
- [20] Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik: ÖVBB-Richtlinie „Innenschalenbeton“. Wien, 2003.

### Zum Autor

Mag. (FH) Dipl.-Ing. Dr. techn. Stefan Krispel  
Studium des Bauingenieurwesens und Doktoratsstudium an der TU Wien, Diplomstudium  
Wirtschaftsberatung an der FH Wr. Neustadt, seit 2003 im Forschungsinstitut der Vereinigung der  
Österreichischen Zementindustrie, ab 2005 Leiter Abteilung Beton  
*krispel@voezfi.at*