

# Kollo quium 2013

Forschung & Entwicklung für Zement und Beton

**Kurzfassungen der Beiträge**

Ausgabe 7.11.2013



# Inhalt

## Betontechnologie

### **Forschungsprojekt „Absorptionsbeton“ zum Schutz von Personen und Bauwerken**

DI Thomas Schönbichler, Cooperative Leichtbeton Werbegemeinschaft GmbH; DI Christian Rauch, Porr

### **Der Einfluss des Vakuummischprozesses auf die Porosität von Ultra High Performance Concrete (UHPC)**

DI Dr. Johannes Kirnbauer, TU Wien, Institut für Hochbau und Technologie

### **Innovative Eigenschaften HPC und UHPC-Betonsorten – bruchmechanisch betrachtet**

Ao. Prof. Dr.hc. Elemer Bölcskey, DI Dr. Johannes Kirnbauer,

Ass.Prof. DI Dr. Heinrich Bruckner, TU Wien, Institut für Hochbau und Technologie

### **Einflussfaktoren auf die Frost-Taumittelbeständigkeit von Betonfahrbahndecken**

DI Michael Steiner, ASFINAG Bau Management GmbH; DI Dr. Martin Peyerl, Smart Minerals GmbH

### **Bohrpfahlbeton – Untersuchungen zum Nachfließverhalten**

DI Stefan Marchtrenker, DI Dr. Martin Peyerl, Mag.(FH) DI Dr. Stefan Krispel, Smart Minerals GmbH

### **Bestimmung des Glimmergehalts – Formtrenntisch**

DI Rene Stelzer, DI Guido Cresnik, ARGE Tunnelprüftechnik

## Zement / Zusatzmittel

### **Hydratationsgradbasierte Kennwerte zur Vorhersage der Dauerhaftigkeit von Beton**

Dr.-Ing. Sebastian Palm, Dr.-Ing. Christoph Müller, VDZ

### **Infrarotspektroskopie für die Zementindustrie und Zementforschung:**

#### **Produktentwicklung, Prozessanalytik und Qualitätssicherung**

Dr. Jürgen Kasberger, DI Robert Holzer, RECENDT GmbH

### **Möglichkeiten für Baustoffuntersuchungen mit dem Morphologi G3-ID**

DI Dr. Ameneh Schneider, Alexander Marcini, VÖZFI ; DI(FH) Andreas Erker, Bautechnisches Institut Linz

### **Einfluss von Zementparametern auf das rheologische Verhalten des Zementleims**

DI Dr. Ameneh Schneider, DI Dr. Martin Peyerl, Smart Minerals GmbH

Ass.Prof. DI Dr. Heinrich Bruckner, TU Wien, Institut für Hochbau und Technologie

### **Pore structure and microstructure analysis of G-Oil Well cement cured under higher hydrothermal conditions**

Prof. Dr. Martin T. Palou, Vladimír Živica, Thomáš Ifka, Lubomír Bágel,  
Slovak Academy of Sciences, Institute of Construction and Architecture

## Neue Bauverfahren / Technologien

### **„Concrete Design Award“ – Betonmöbel aus Textilbeton**

DI Benjamin Kromoser BSc., TU Wien, Institut für Tragkonstruktionen

### **Projekt GrünStadtKlima: Optimierung des städtischen Klimas und Wasserhaushalts**

DI Bernhard Scharf, Boku, Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau

### **Albedo unterschiedlicher Pflasterungen aus Betonsteinen**

DI Heidelinde Trimmel, Boku, Institut für Meteorologie

### **Echtzeitmonitoring der Betondruckfestigkeitsentwicklung zur Qualitätssicherung und Optimierung des Bauprozesses**

DI Dr. Alexander Reinisch, Doka Industrie GmbH; DI Dr. Martin Peyerl, Mag.(FH) DI Dr. Stefan Krispel, Smart Minerals GmbH

### **Monitoring basierte, nichtlineare, probabilistische Analyse der Querkrafttragfähigkeit von Spannbetonfertigteilen**

Bmstr. DI Bernhard Krug, Franz Oberndorfer GmbH & Co KG

### **Optimierung der Frästechnik zur Ausbildung eines bestmöglichen Verbundes**

DI Dr. Martin Peyerl, Smart Minerals GmbH; Bmstr. Ing. Günter Vogl, Michael Seebacher, H. Junger GmbH

### **Kombination von Doppelwänden und Schalungssystemen zur Herstellung von Brückenquerschnitten**

DI Sara Foremniak BSc., TU Wien, Institut für Tragkonstruktionen

### **Ersteinsatz von UHPCFRC bei der Ertüchtigung und Adaptierung von Autobahn- und Schnellstraßenbrücken in Österreich**

DDI Erwin Pilch, Asfinag BMG

### **Anwendung von UHPC in der Abwassertechnik**

DI Liviu Roman, DI Dr. Jürgen Macht, Kirchdorfer Gruppe

### **Türme für Windkraftanlagen aus Doppelwandelementen**

DI Maria Charlotte Schönweger, TU Wien, Institut für Tragkonstruktionen





**An das  
Forschungsinstitut der Vereinigung  
Der Österreichischen Zementindustrie  
Reisnerstrasse 53  
A- 1030 Wien**

Wien, den 5. November 2013  
Kontaktperson: DI. T.Schönbichler

Betrifft: Anmeldung zu einem Kurzbeitrag beim Kolloquium am 6.11.2013 zu dem  
Forschungsprojekt „Absorptionsbeton“ zum Schutz von Personen und Bauwerken

ein, von der FFG als Branchenprojekt gefördertes und im Mai 2013 abgeschlossenes Projekt.

Schäden an Personen und Bauwerken werden immer dramatischer

Nachweislich werden die Vorkommnisse im öffentlichen Straßenverkehr, bei denen Personen und/oder Bauwerke zu Schaden kommen immer gravierender und dramatischer. Sei es, dass ein Bus im Tunnel frontal gegen eine Wand fährt oder dass vermehrt große Gesteinsbrocken auf Straßen oder Schutzbauwerke krachen. Durch verschiedene Umstände steigen nicht nur die Belastungen durch den Verkehr, sondern auch die Auswirkungen durch Verkehrsunfälle und extreme Naturereignisse. Aus eben jenen Gründen kam es durch eine konkrete Bauherrenseitige Fragestellung an die Cooperative Leichtbeton Werbegemeinschaft GmbH und die PORR-TM/TE zu dem Ansatz, kinetische Energie, wie sie bei solchen Geschehnissen frei gesetzt wird, mit Hilfe von Leichtbetonen zu absorbieren.

Forschung bedeutet Neues zu suchen

Es war Anlass genug, gemeinsam mit Vertretern des Landes Salzburg und der ASFINAG als betroffene Interessenten ein gefördertes Forschungsprojekt zu diesem Thema einzureichen. Im November 2011 wurde der Cooperative Leichtbeton Werbegemeinschaft GmbH als Förderwerber die Bewilligung zu dem mit 60% von der FFG geförderten Projekt erteilt. Als Sponsoren trugen die ASFINAG, das Land Salzburg, Abt. 6.2, die Leichtgesteinshersteller Liapor und Technopor und der Zusatzmittelhersteller BASF die erforderlichen Barmittel bei. Die Firmen KFTH (Kirchdorfer Fertigteilverwaltung) und Teerag Asdag brachten den ebenso bedeutenden Beitrag der sogenannten Inkind- Leistungen ein.

Als Wissenschaftliche Partner wurden die TU-Graz, Abteilung VSI und die Universität Innsbruck, AB Materialtechnologie gewonnen, die technische Betreuung erfolgte durch das Büro Dr. W. Lindlbauer und die Bautech Labor GmbH

Das vorrangige Ziel dieses Projektes war die Entwicklung von hochenergieabsorbierenden Leichtbetonzusammensetzungen für unterschiedliche Anwendungsgebiete, um negative Auswirkungen auf Infrastrukturbauwerke und deren Benutzer möglichst zu verringern. Mit folgenden zwei Schlagworten kann diese grundlegende Zielsetzung somit definiert werden:

- Personenschutz
- Bauwerksschutz

Neue Leichtbetonzusammensetzungen erweisen sich besser als Forderungen

Leichtbetone zeichnen sich durch deren materialcharakteristischen Eigenschaften besonders günstig für die Erfüllung der nicht leicht zu erfüllenden Anforderungen aus. Um die hohen dynamischen Belastungsannahmen – für ein möglichst breites Spektrum an Anwendungsmöglichkeiten – bestmöglich absorbie-

ren zu können, galt es die vom Planungsbüro Dr. Lindlbauer geforderten Materialkennwerte so gut als möglich zu erreichen. Das Programm sah vor, mit Variationen der Eigenschaften Festigkeit, Raumgewicht und E- Modul einen sinnvoll machbaren Rahmen zu entwerfen und anschließend einem umfangreichen Prüfprogramm durch die Bautech Labor GmbH zu unterziehen.

Die Prüfung von dynamischen Eigenschaften spielt in der Betontechnologie eine noch eher untergeordnete Rolle. Um das Absorptionsvermögen von Materialien jeglicher Art beurteilen zu können, wurde in diesem Forschungsprojekt auch noch eine dynamische Prüfmethode im Labormaßstab (Impaktorversuchsanlage) entwickelt um zu den statischen Materialkennwerten auch noch die materialspezifischen dynamischen Kennwerte zu erhalten. Hierbei ist es möglich einen Leichtbetonprobekörper durch einen Impaktor mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten dynamisch zu belasten und als Ergebnis ergibt sich die verbleibende Kraft hinter dem Probekörper, die Eindringtiefe und die negative Beschleunigung des Impaktors nach dem Aufprall.

#### Fahrzeugtechnik trifft Betontechnik

Die Resultate dieser sogenannten Kleinimpaktorversuche ergaben die dynamischen Eigenschaften und Kennwerte der Leichtbetonzusammensetzungen. Gemeinsam mit den statischen Kennwerten bildeten sie die Basis für ein parallel entwickeltes Simulationsmodell, dessen Ergebnis das neu eingeführte Beurteilungskriterium bzw. die Kenngröße **„Absorptionszahl“** ist.

Somit ist es nun möglich Materialien nicht nur bezüglich derer statischen Materialkennwerte zu vergleichen, sondern auch hinsichtlich ihres Absorptionsvermögens von kinetischer Energie.

Die Resultate des Simulationsprogrammes wiederum wurden am Institut VSI an der TU Graz mit den Messwerten sogenannter Crash- Tests, die aus der Fahrzeugtechnik (Anpralltests mit Dummies) bekannt sind, überprüft und verglichen. Durch die Produktion von Großversuchskörpern aus den neu entwickelten Absorptionsbetonen ergab sich die Möglichkeit, die ebenfalls neu entwickelte Impaktorversuchsanlage und das dazugehörige Simulationsmodell im Maßstab 1:1 zu validieren. Dazu wurde ein Großimpaktor (Faktor 10 zum Laborimpaktor), befestigt an einem Fahrzeug, mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten gegen diese Großversuchskörper beschleunigt. Anhand von Aufzeichnungen von Hochgeschwindigkeitskameras, diversen Beschleunigungsmessungen, u.dgl. konnte nachgewiesen werden, dass die mittels Impaktorversuchsanlage in Kombination mit dem Simulationsmodell eruierte Absorptionszahl auch im Maßstab 1:1 ihre Gültigkeit als Beurteilungskriterium hat.

#### Die Ergebnisse sind vielversprechend

Die Ergebnisse dieses Forschungsprojektes sind neue Leichtbetonzusammensetzungen von denen sowohl statische als auch dynamische Kennwerte bekannt sind, eine dynamische Prüfmethode im kleinen Maßstab, eine Simulationstool zur Abschätzung des dynamischen Verhaltens und ein Merkblatt, das die wesentlichen Ergebnisse dieses Projektes zusammengefasst. Sie stellen die Basis für neue Produktentwicklungen dar und werden der Branche zur Verfügung gestellt.

Erste Simulationsberechnungen haben ergeben, dass eine absorbierende Wirkung schon bei geringen Schichtstärken gegeben sind, sodass mögliche Anwendungsgebiete für die nachfolgende Produktentwicklung z.B.:

- neue Absorptionselemente zur Verbesserung des Aufprallschutzes bei Tunnelportalen und Tunnelnischen,
- neue leichte Leichtbetonzusammensetzungen bzw. Betonelemente auf Steinschlag- und Lawingalerien (um die derzeitige hohe Überschüttung einzusparen und somit auch das Tragwerk neu zu ertüchtigen oder an sich schlanker dimensionieren zu können),
- neue Leichtbetonzusammensetzungen für Leiteinrichtungen (damit neben der Führung von anprallenden Fahrzeugen auch die Geschwindigkeit so rasch als möglich reduziert wird) und
- generell neue Dämpfungssysteme für den Verkehrswegebau (im Flussbau Pfeilerschutz bei Brücken,...) sind.

In dem nun bereits neu verfassten Folgeprojekt sollen konkrete Ansätze für die Auswirkungen auf statische Bemessungen in Hinblick auf die Erhöhung der Sicherheit von Fahrzeuginsassen und der Erhöhung der Lebensdauer von Verkehrsinfrastrukturbauwerken gefunden werden. Des Weiteren wird das Merkblatt zu einer Richtlinie ausgearbeitet und soll in Zukunft als Grundlage für Planer, Hersteller und Verwender dienen.

Autoren und Vortragende:

Cooperative Leichtbeton Werbegemeinschaft GmbH  
A-1061 Wien, Gumpendorferstraße 19 - 21  
Kontaktperson: DI Thomas Schönbichler  
Mobil: 0664 423 77 52, e-mail: [c.leichtbeton@aon.at](mailto:c.leichtbeton@aon.at)  
[www.leichtbeton.at](http://www.leichtbeton.at)

PORR AG  
Technologiemanagement | Technologieentwicklung  
7. Haidequerstrasse 1, 1110 Wien  
Kontaktperson: DI Christian Rauch  
Mobil: 0664 626 59 77, e-mail: [christian.rauch@porr.at](mailto:christian.rauch@porr.at)

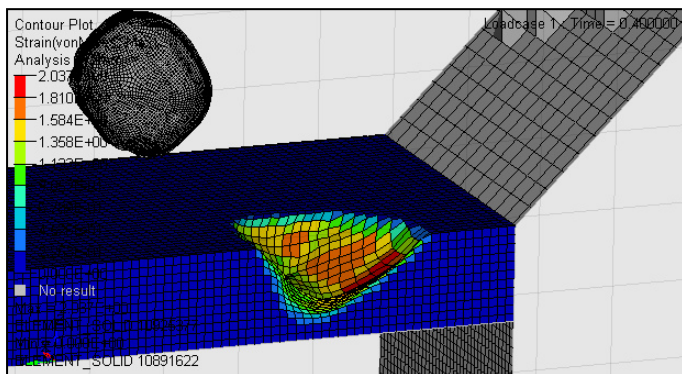


Abbildung 1, VSI: Simulation eines Steinschlages auf eine Schutzschicht aus Absorptionsbeton

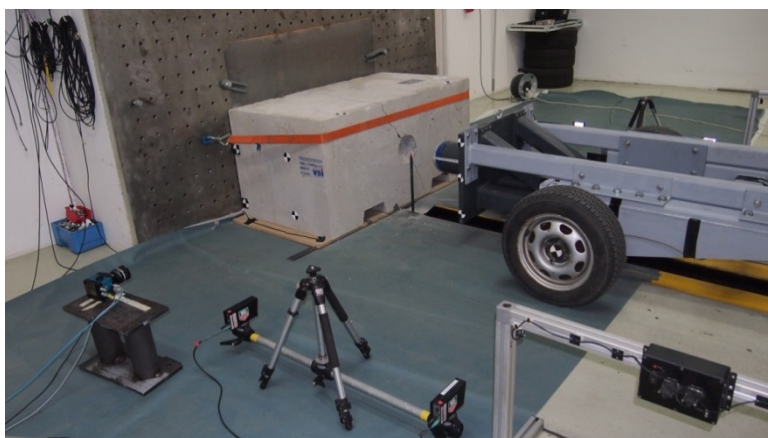


Abbildung 2, VSI: dynamische Belastung auf die neu entwickelten Absorptionsbetonzusammensetzungen

# **Der Einfluss des Vakuummischprozesses auf die Porosität von Ultra High Performance Concrete (UHPC)**

Dipl.-Ing. Dr.techn. Johannes Kirnbauer

TU Wien, Institut für Hochbau und Technologie – Forschungsbereich für Baustofflehre, Werkstofftechnologie und Brandsicherheit

## **Einleitung**

Zu den Auswirkungen des Vakuummischprozesses auf die Eigenschaften von UHPC lagen bislang nur wenige Untersuchungen vor. Es ist bekannt, dass durch das Anlegen eines Unterdruckes von etwa 60 mbar während der letzten Mischphase der Beton bereits während des Mischens entlüftet wird. Dadurch werden Verdichtungsporen verhindert, was zu einer Steigerung der Druckfestigkeit führt. Im Rahmen der Dissertation des Verfassers wurde daher eine Reihe weitergehender Untersuchungen durchgeführt, beispielsweise wurden die Auswirkungen von Wärmenachbehandlungen auf vakuumgemischtem UHPC geprüft. Dabei wurden nicht nur die resultierenden mechanischen Eigenschaften des Betons untersucht, sondern auch die Mikrostruktur (Porosität) mit Hilfe der Quecksilberporosimetrie.

## **Versuchsdurchführung und Ergebnisse**

Für diese Versuchsreihe wurde eine klassische UHPC-Rezeptur mit CEM I 42,5 R (C<sub>3</sub>A-frei), Mikrosilika, Quarzmehl und Quarzsand mit einem Größtkorn von 0,5 mm verwendet. Der W/Z-Wert betrug 0,26. Der Luftgehalt des plastischen Frischbetons konnte durch das Mischen bei 60 mbar über zwei Minuten von 5,5 % auf 0,8 % verringert werden. Das entspricht einer Reduktion des Luftgehaltes um 86 %.

Die Probekörper (Prismen 4x4x16 cm) wurden folgenden Nachbehandlungen unterzogen:

1. Normlagerung (NL) in Anlehnung an ÖNORM B 3303,
2. Luftlagerung bei Raumtemperatur 20 °C (L20),
3. Heißwasserlagerung bei 90 °C für 48 h (W90), danach Luftlagerung bei Raumtemperatur,
4. Heißluft 90 °C für 48 h (L90), danach Luftlagerung bei Raumtemperatur,
5. Heißluft 250 °C (L250) für 6 Tage, danach Luftlagerung bei Raumtemperatur,
6. Heißwasser 90 °C für 48 h, danach Heißluft 250 °C für 48 h (W90L250), danach Luftlagerung bei Raumtemperatur.

Die Druckfestigkeit nach 28 Tagen konnte im Vergleich mit der Normlagerung (NL) nur durch die Wärmenachbehandlungen um bis zu 38 % (bei L250) gesteigert werden. Nur durch den Vakuummischprozess erhöht sich die Druckfestigkeit nach 28 Tagen um bis zu 26 % (bei W90L250). Die Anwendung beider Maßnahmen hat gezeigt, dass sich die festigkeitssteigernden Wirkungen nicht nur addieren, sondern sich gegenseitig leicht verstärken. Es konnten in dieser Versuchsreihe keine negativen Wechselwirkungen zwischen Wärmenachbehandlung und Vakuum-mischprozess in Bezug auf die Druckfestigkeit festgestellt werden.

In Abbildung 1 sind die Porengrößenverteilungen und die Porenvolumina von UHPC bei Normlagerung (NL) und der kombinierten Heißwasser-/Heißluftlagerung (W90L250) dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Porengrößenverteilung bei der Nachbehandlungsmethode W90L250 deutlich von jener der Normlagerung abweicht. Das ist auf Kristallisationsvorgänge bei hohen Temperaturen von über 200 °C während der Nachbehandlung zurückzuführen. Der überwiegende Anteil der Poren liegt im Bereich < 50 nm und kann somit als Mesoporen bezeichnet und den Gelporen zugeordnet werden kann. Andererseits wurden praktisch keine Poren > 50 µm festgestellt, die als Makroporen den Luftporen zuzuordnen wären. Dazwischen liegt der Bereich, der als Kapillarporosität bezeichnet wird.

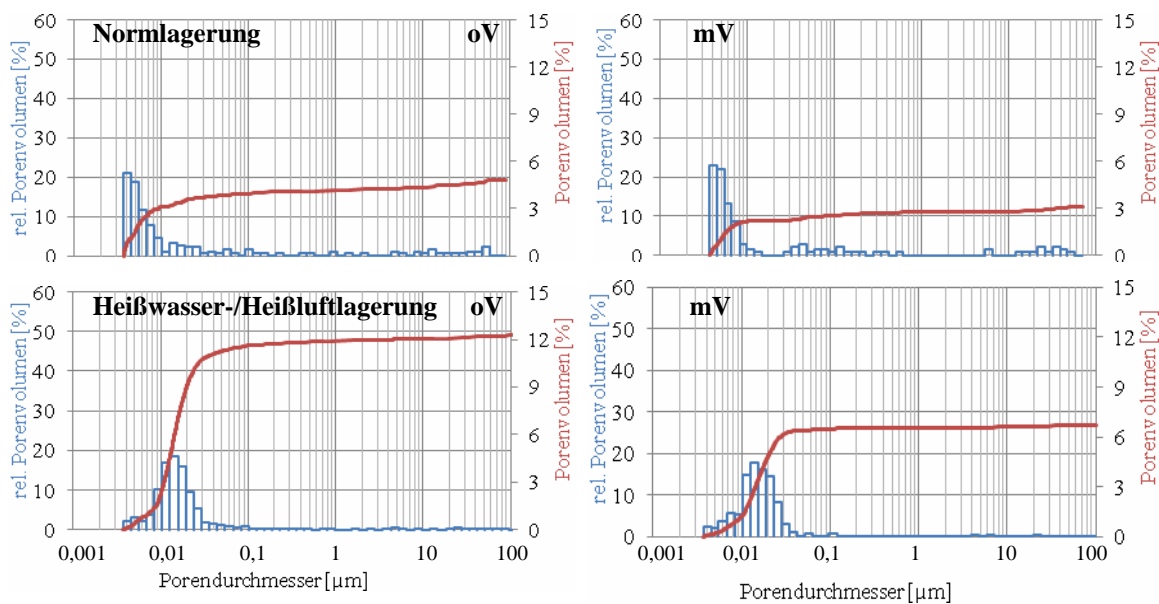


Abbildung 1: Porengrößenverteilung und Porenvolumen bei Normlagerung und kombinierter Heißwasser-/Heißluftlagerung (oV ohne Vakuum, mV mit Vakuum)

In Abbildung 2 ist die Gesamtporosität der Betone, getrennt nach dem Anteil der Gelporen und der Kapillarporen, resultierend aus den jeweiligen Herstellungs- und Nachbehandlungsmethoden, dargestellt. Die Gesamtporosität stellt das Verhältnis von Porenvolumen zu Probenvolumen dar, und wird in Prozent angegeben. Die Gesamtporosität des normgelagerten Betons betrug 4,8 Vol.-%. Bei allen anderen Nachbehandlungsmethoden wurde eine höhere Gesamtporosität festgestellt. Die höchste Gesamtporosität stellte sich bei den beiden Nachbehandlungen mit Heißluft über 200 °C ein, wobei der zuvor mit Heißwasser behandelte Beton (W90L250) eine etwas höhere Gesamtporosität aufwies als der nur bei Heißluft nachbehandelte Beton. Bei den 90 °C-Nachbehandlungen war die Gesamtporosität beim heißluftbehandelten Beton (L90) etwas niedriger als beim heißwassergelagerten Beton (W90). Bemerkenswert war, dass bei allen Nachbehandlungsmethoden die Gesamtporosität der vakuumgemischten Betone deutlich unter jener der ohne Vakuum gemischten Betone lag. Die Porengrößenverteilung wurde jedoch maßgeblich von der Nachbehandlungsmethode bestimmt, der Einfluss des Vakuummischprozesses darauf war gering (Abbildung 1).

Durch den Vakuummischprozess wurden nicht nur Verdichtungs- und Luftporen aus

dem Frischbeton entfernt, sondern auch die Porosität des Festbetons im Bereich der Kapillar- und der Gelporen beträchtlich verringert.

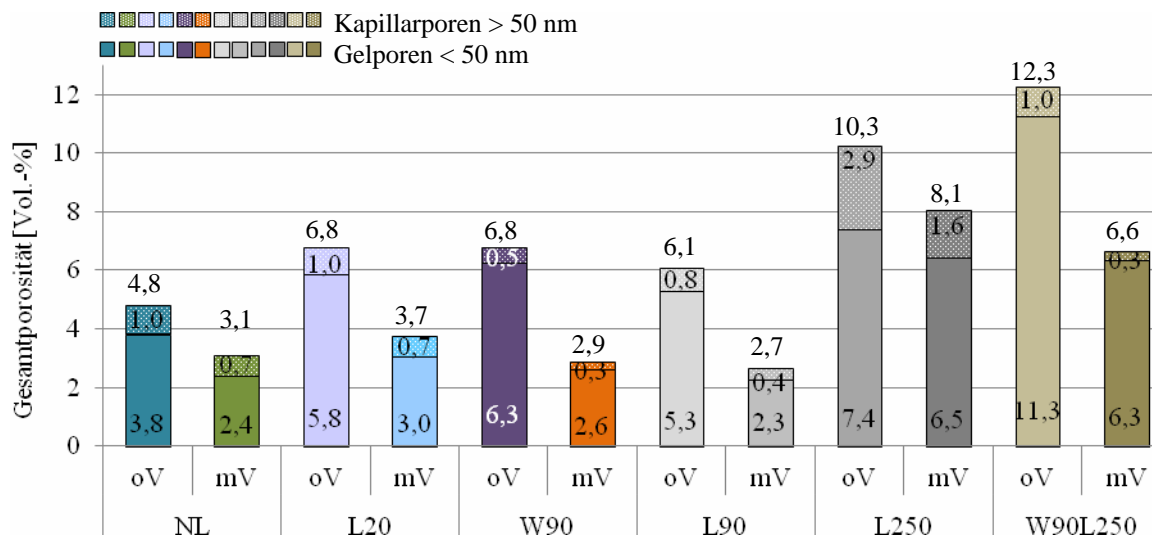


Abbildung 2: Gesamtporosität aller Betone (oV ohne Vakuum, mV mit Vakuum, NL Normlagerung, W90 Heißwasserlagerung 90°C, L90 Luftlagerung 90 °C, L250 Luftlagerung 250 °C, W90L250 Heißwasser-/Heißluftlagerung)

## Zusammenfassung und Ausblick

Durch den Vakuummischprozess wird der Luftgehalt des Frischbetons bereits während des Mischens drastisch reduziert. Das kann Vorteile beim Einbau des Betons bringen (z.B. in Hinblick auf das Absetzen von Stahlfasern), da nicht mehr verdichtet werden muss.

Das Zusammenwirken des Vakuummischprozesses und einer nachfolgenden Wärmenachbehandlung des Betons kann zu einer beträchtlichen Steigerung der Druckfestigkeit führen, wobei sich die Festigkeitssteigerungen beider Maßnahmen addieren.

Der Vakuummischprozess beeinflusste die Porengrößenverteilung nur wenig, verringerte aber die Gesamtporosität beträchtlich und hat so auch einen deutlichen Einfluss auf die Mikrostruktur des Betons.

Einerseits könnte das noch dichtere Gefüge die Dauerhaftigkeit von UHPC weiter verbessern, andererseits könnte dadurch aber die Brandbeständigkeit verschlechtert werden. Dazu sind bereits weitere Untersuchungen geplant.



## Innovative Eigenschaften HPC und UHPC-Betonsorten – bruchmechanisch betrachtet

Ao.Univ.Prof. i.R. Baurat h.c. DDr. Elmer Bölsckey  
 Univ. Ass. Dipl. Ing. Dr. techn. Johannes Kirnbauer  
 Ass. Prof. Dipl. Ing. Dr. techn. Heinrich Bruckner

Die Erforschung von Hochleistungsbeton als innovativer und entwicklungsfähiger (Verbund-)Baustoff hat eine 100-jährige Erfolgs- und Entwicklungsgeschichte. Angefangen u.a. auch in in Österreich-Ungarn an der ehemaligen Technischen Hochschule von Wien (vor allem von Honorarprof. F. v. Emperger und Prof. Salinger) wurden viele Aktivitäten/Bemühungen zur Klärung des Tragverhaltens von Beton und „Eisenbeton“-Bauwerken gesetzt [1] [2]. Diese Entwicklung wurde in Deutschland in den 50-er Jahren von Otto Graf und später von K. Walz [3] fortgesetzt. Damit wurden bereits vor einem halben Jahrhundert die prinzipiellen betontechnologischen Grundlagen für die zielsichere Projektierung bzw. Herstellung von Hochleistungsbeton mit modifizierten Mischungsbestandteilen (und mit optimierten baustoffspezifischen Parametern) geschaffen [4].

Obwohl die Zugfestigkeit des hochfesten und ultrahochfesten Betons- dem „spröden“ Werkstoff-Charakter entsprechend- in Relation zur Druckfestigkeit sehr niedrig ist (sie beträgt max. ~10% davon) – gibt es zahlreiche Phänomene und baupraktische Problemstellungen (z. B. Durchstanz- Problematik, Brandbeanspruchung, Maßstabeffekte) die ohne gründliche Kenntnisse des Trag- bzw. Verformungsverhaltens von zugbeanspruchtem Beton nicht modellierbar sind.

Da das Versagensverhalten eines zugbeanspruchten Betonbauteils entscheidend durch das Vorhandensein und Wachstum von Mikrorissen (meistens zwischen Zementstein und Zuschlag in der Kontaktzone) bestimmt wird, „ist es nahliegend, bruchmechanische Konzepte, d. h. Energiebetrachtungen bzw. die Berücksichtigung örtlicher Spannungskonzentrationen an Fehlstellen/Rissen, zur Beschreibung des (Material-)Verhaltens bei Zug- (bzw. Querkzug)-beanspruchung anzuwenden. In der Forschung, aber auch bei FE-Analysen wird daher die sog. Bruchenergie  $G_F$  als bruchmechanischer Kennwert zur Beurteilung des Widerstandes von Beton gegen eine Zugbeanspruchung herangezogen“...[5].

Bereits im Jahre 1921 ging der englische Forschungsingenieur und Bruchmechanik-Pionier A.A. Griffith (1893-1963) in seiner klassischen Arbeit über Sprödbrechmechanik („LEBM“) [6] von der Grundidee aus, dass die gespeicherte (elastische) Verformungsenergie beim Bruchvorgang in (Bruch-)Energie zur Verwirklichung/„Schaffung“ neuer Rissflächen umgesetzt wird [7] im Sinne einer Energiebilanz [9] bzw. schuf damit das „energetische, Bruchkonzept“. Mit der konkreten Fragestellung, ob sich bruchmechanische Denkmodelle auch auf den (Verbund-) Baustoff Beton (mit einer „spröden“ Verhaltens- Tendenz bei Zugbeanspruchung) anwendbar sind, hat sich als erster M.F. Kaplan [13] (im Jahre 1961) auseinander gesetzt: Er führte an Biegeproben mit verschiedener Kerbtiefe an der Zugzonenseite Untersuchungen zur Bestimmung bruchmechanischer Werkstoff-Kennwerte (Energiefreisetzungsrate  $G_c$  [14]) durch und verglich die Werte mit theoretischen Berechnungen (beruhend auf Energiebetrachtungen von Griffith [6]): er stellte resümierend fest, dass seine Theorie mit der Definition einer „kritischen Energiefreisetzungsrate“ auf den (Verbund-)Baustoff Beton prinzipiell anwendbar wird.

Eine einheitliche Terminologie für den (in der angelsächsischen und deutschen Bruchmechanik- Fachliteratur) ursprünglich „sehr unscharf“ definierten bruchmechanischen Begriff „energy release rate“/ „Energiefreisetzungsrate“ (also eine Art „spezifische Bruchenergie“) kam von 30 Jahren von H. Blumenauer [15] und K.H. Schwalbe [16]: Die Energiefreisetzungsrate (Dimension  $[Nmm^{-1}]$ ) wird als Energieterm  $G$  definiert, der die auf einem infinitesimalen Rissfortschritt  $dA$  bzw. Rissausbreitung [8] bezogene freigesetzte/bereitgestellte Energie darstellt (in „einfachen linear-elastischen Fall“ kann durch Spannungsintensitätsfaktoren ausgedrückt werden):

$$G = -\frac{dII}{da},$$

wobei  $da$  eine infinitesimal kleine Rissverlängerung ist (Bild 1 nach [8]).

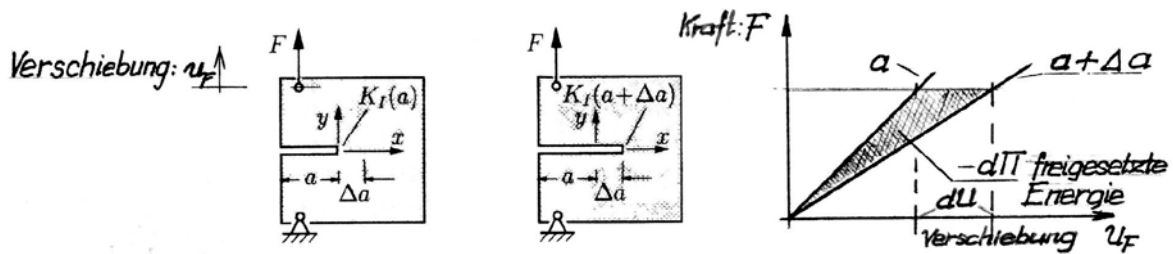


Bild 1: Prinzipielle Erklärung der Energiefreisetzungsrates beim (Rissbelastungs-)Modus I nach [8] an einer CT-Pröbe (compact tension) mit zunehmendem Rissfortschritt.

Im linear elastischen (Spezial-)Fall kann die Energiefreisetzungsrates durch die Spannungsintensitätsfaktoren (je nach Rissöffnungsart:  $K_I$ ,  $K_{II}$  und  $K_{III}$ ) als charakteristisches (Aus-) Maß für die Intensität des Spannungsfeldes in der Risspitzen- Umgebung angegeben bzw. ausgedrückt werden.

Für den „allgemeinen“ (Riss-)Belastungsfall, bei der alle drei Beanspruchungsarten (d.h. Mode I, Normalbeanspruchung z.B. bei zug- und/oder biegebelasteten Bauteilen, Mode II und Mode III ebene und nichtebene Schubbeanspruchungen) überlagert vorkommen, also bei einer räumlichen „Mixed-Mode-Situation“ kann die Energiefreisetzungsrates (pro Einheitslänge der Rissfront) nach [8] und [14] mit nachfolgender Formel beschrieben bzw. umgerechnet werden:

$$G = G_I + G_{II} + G_{III} = \frac{1-\nu^2}{E} \cdot (K_I^2 + K_{II}^2 + \frac{K_{III}^2}{1-\nu})$$

Versuche, u. a. von Zaitsev und Wittmann [10] haben gezeigt, dass die Querdehnungszahl  $\nu$  für Beton (und Zementstein) nur für relativ kleine Lasten als eine Konstante ( $\sim 0,15-0,28$ ) angenommen werden kann. Bei höherer Dauerlast (etwa ab 70% der Bruchspannung) wird diese (als Funktion der Lasthöhe) im wachsenden Maße ansteigen bzw. ändert sich auch zeitabhängig. (Dieses Phänomen kann groß teils durch die zunehmende Rissausbreitung während des Kriechvorganges erklärt werden, siehe Bild 2).

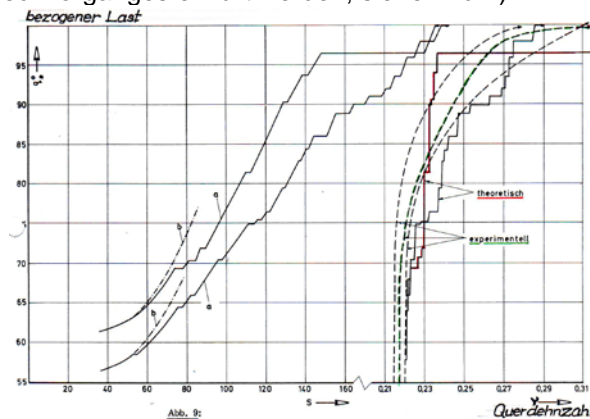


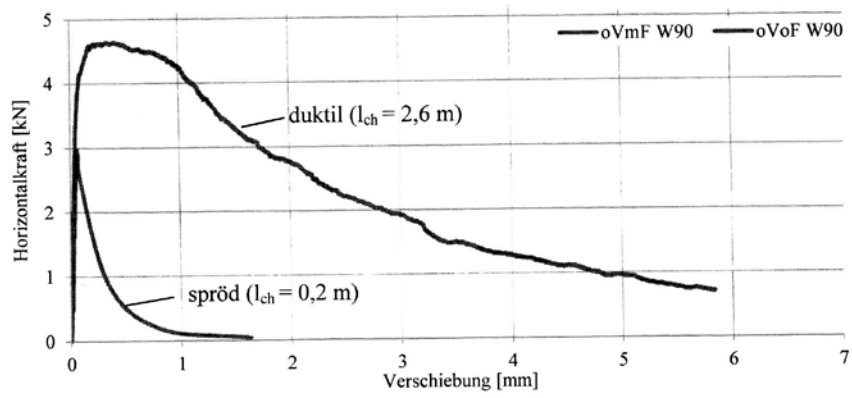
Bild 2: Ansteigerung der Querdehnungszahl  $\nu$  nach experimentellen und theoretischen Untersuchungen von Zaitsev und Wittmann [10] als Last- bzw. Rißlängen („a“) -Funktion. ( $\nu_{max} \approx 0,35$  bei extrem hoher Dauerlast)

Die abgeschätzte Veränderung/Verringerung der Energiefreisetzungsrates (bei höherer Dauerlast bis ca. 10-15%!) zeigt auf, dass die „energiebetrachtete“ Bruchmechanische (Beton-) Kenngröße Bruchenergie  $G_F$  (als erforderliche Energie zur Erzeugung eines „Einheitslänge“ –langen Risses (Maß-) Einheit:  $[Nmm/mm^2=N/mm]$ ) keine Konstante, sondern eine zeitabhängige Variable wird (grob vergleichbar etwa mit dem Schubmodul „G“ des Betons). Von H. Blumenauer [13] wurde als kritischer Wert der Energiefreisetzungsrates beim Einsetzen von Risswachstum, die „spezifische Rissausbreitungsenergie“  $G_c$  (als eine Art „Risswiderstandskraft“, als Materialkennwert bzw. „Materialwiderstand“-Reaktion) eingeführt. Durch die bruchmechanische Formulierung nach Prinzipien des „Griffithischen Bruchkriteriums“ als „Sonderfall“ des Kräftegleichgewichtes gilt:  $G = G_c$  [7], [8]. Mit Hilfe der Bruchenergie  $G_F$  lässt sich die sogenannte Sprödigkeitsziffer „B“ berechnen, als „Relation“ zwischen der in einem Körper unter zentrischem Zug mit der Länge „l“ bei Einsetzen der Rissbildung gespeicherten Verformungsenergie und der zur vollständigen Rissöffnung notwendigen („verzehrten“) Bruchenergie  $G_F$ . Sprödigkeitsziffern größer als 1,0 weisen im Allgemeinen auf ein sprödes Baustoff- bzw. Bauteilverhalten hin. Durch Umformen der o. a. Sprödigkeitsziffer-Gleichung erhält man die charakteristische Länge  $l_{ch}$ .

$$l_{ch} = \frac{E \cdot G_F}{f_{ct}^2} \quad \text{[mm]}$$

$\swarrow$  Bruchenergie  
 $\searrow$  Zentrische Zugfestigkeit

Bei der rechnerischen Ermittlung der charakteristischen Länge  $l_{ch}$  im Rahmen einer Forschungsarbeit im Bereich Werkstofftechnik und Brandsicherheits-Labor der TU Wien [12] ergab sich für den UHPC-(Stahlfaser-)Beton (E-Modul  $\approx 60.000$  MPa) mit der Bruchenergie- steigender Faserzugabe einen hohen  $l_{ch}$  – Wert von 2,6 m (!) (siehe Bild 3).



**Bild 3: Last-Verschiebungsdiagramm der (UHPC-)Mischungen ohne und mit Stahlfasern zur Demonstration bzw. Vergleich bruchmechanischer Kenngrößen bei der Beurteilung der Zähigkeitserhöhung (Duktilität) [12].**

(Als Vergleichs-Beispiel für einen tatsächlich duktilen Werkstoff wird in der Fachliteratur z.B. Asphalt mit einem charakteristischen Wert von 0,6 m angeführt).

## Literatur

- [1] Handbuch für Eisenbetonbau, Hrsg. F. v. Emperger, 4. Bd., 1.Tel, Salinger, R., Knapp, W. u.a., Die Sicherheit gegen Feuer, Blitz und Rost, innerer Ausbau, Treppen, Kragbauten, Dachbauten, Kuppelgewölbe, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 1909
- [2] Pauser, A.: Brücken in Wien- Ein Führer durch die Baugeschichte 2005 Springer-Verlag Wien, New York, Hrsg.: Österreichischer Ingenieur- und Architekten-Verein
- [3] Walz, K.: (1966) Über die Herstellung von Betonen mit höchster Festigkeit, beton Heft 8, 1966, S 339-340
- [4] König G., Nguyen Viet Tue; Zink M. / Univ Leipzig 2001: Hochleistungsbeton – Bemessung, Herstellung und Anwendung Ernst & Sohn ISBN 3-43301738-7 Verlag für Architektur und techn. Wissenschaften GmbH. Berlin
- [5] Beton-Kalender 2002, Hrsg/Schriftleitung Prof. J. Eibl, BK 1, Teil A: Reinhardt, H.-W.: Beton; Verlag Ernst & Sohn Verlag für Arch. u. technischen Wissenschaften GmbH, Berlin
- [6] Griffith, A.A.: The phenomena of rupture and flow in solids. Philosophical Transactions, Series A, 221:163-198, 1921
- [7] Bölcskey, E., Schneider, U.: Die Zerbrechlichkeit der „Transparenten (Glas-)Architekturbruchmechanisch betrachtet S. 45-86 Beiträge zum Internationalen Symposium vom 18.-19. 10.2012 am Inst. f. Hochbau und Technologie an der TU-Wien und an der NDU St. Pölten
- [8] Gross, D., Seelig Th.: Bruchmechanik- Mit einer Einführung in die Mikromechanik 4. Auflage Springer- Verlag Berlin Heidelberg 2007
- [9] Kuna, M.: Numerische Beanspruchungsanalyse von Rissen Finite Elemente in der Bruchmechanik Vieweg + Teubner/ GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2008



- [10] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (Herausgeber); Heft 232 Bestimmung physikalischer Eigenschaften des Zementsteins Verformung und Bruchvorgang poröser Baustoffe bei kurzzeitiger Belastung und Dauerlast von Dr. rer.nat. F. Wittmann und Kand. D. Techn. Wiss. J. Zaitsev, Laboratorium für Werkstoffphysik der Technischen Universität München Vertrieb durch Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin-München-Düsseldorf 1974
- [11] Gvozdev, A.A.: Rascjot nesuscej spsobnosti konstrukcij pro metodu redelnogo ravnoyesija (Berechnung der Tragfähigkeit der Konstruktionen nach dem Verfahren des Gleichgewichts im Grenzzustand) Moskau, Gosstrojizdat, 1949 (in Russisch)
- [12] Kirnbauer, J.: Der Vakuummischprozess zur Herstellung von Ultra High Performance Concrete; Dissertation an der TU-Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen, Juni 2013
- [13] Kaplan, M.F.: Crack Propagation and the Fracture of Concrete; Journal of the American Concrete Institute, Vol. 58, November 1961 pp 591-609
- [14] Richard, H.A.; Sander, M.: Ermüdungsrisse- Erkennen, sicher beurteilen, vermeiden Vieweg + Teubner IGWY Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2009
- [15] Blumenauer, H.; Pusch, G.: Technische Bruchmechanik. Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig (1982) 1. Auflage, S 60 (siehe AMK-Büchersammlung unter E 29-1)
- [16] Schwalbe, K.-H.: Bruchmechanik metallischer Werkstoffe. Carl Hanser Verlag, München Wien (1980) ISBN 3-446-12983-9 (siehe AMK-Büchersammlung unter E 15)

## **Einflussfaktoren auf die Frost-Taumittelbeständigkeit von Betondecken**

DI Michael Steiner

ASFINAG BAU MANAGEMENT GMBH – Technik, Innovation und Umwelt

DI Dr. Martin Peyerl

Mag.(FH) DI Dr. Stefan Krispel

Smart Minerals GmbH

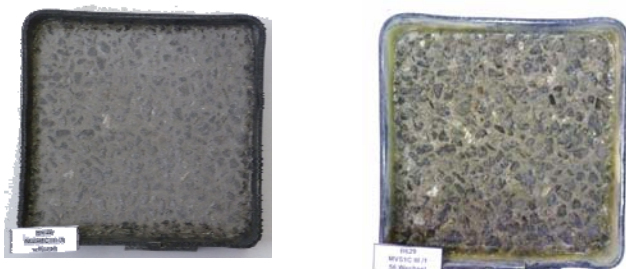
### Problemstellung

Bei der Herstellung von Betondecken werden sehr hohe Anforderungen an die Beständigkeit der Oberflächen gegenüber äußeren Einflüssen – insbesondere der Frost-Taumittel-Beständigkeit – gestellt, die über die gesamte Lebensdauer gewährleistet werden müssen. Grundlage hierfür ist Beton mit einer gleichbleibend hohen Qualität (erforderlicher Bindemittelgehalt und W/B-Wert sowie ein adäquates Luftporensystem im Festbeton) und eine gute Nachbehandlung der eingebauten Betondecke. Aufgrund unterschiedlichster Einflussfaktoren beim Herstellungsprozess, aber auch durch äußere Einflüsse zufolge Witterung, wurde festgestellt, dass die gestellten Anforderungen nicht immer zielsicher erreicht werden können.

### Versuchsprogramm

Im Rahmen eines von der FFG Verkehrsinfrastrukturforschung ausgeschriebenen Projektes wurde von der Smart Minerals GmbH geklärt, inwieweit sich eine ungenügende Betonqualität auf die Frost-Tausalz-Beständigkeit des Betons über seine Lebensdauer auswirkt. Hierfür erfolgen Laboruntersuchungen zur Aufstellung von Zusammenhängen zwischen Luftporenverteilung, W/B-Wert, Porosität des Bindemittelsteins und Nachbehandlung in Relation zu Abwitterungserscheinungen zufolge Frost-Tausalz-Beanspruchung.

Um die Auswirkungen der unterschiedlichen Einflussfaktoren bei in Österreich gebräuchlichen Oberbetonrezepturen zu klären, wurden nach umfangreichen Voruntersuchungen mehr als 20 Mischungsverhältnisse ausgewählt und einer Frost-Tausalz-Beanspruchung gemäß ONR 23303 [1] ausgesetzt. Um Abweichungen zu den Sollvorgaben gemäß RVS 08.17.02 [2] versuchstechnisch abzubilden, erfolgte die Variation des W/B-Wertes (0,38, 0,42 und 0,47), der Luftporenkennwerte (Zielwert Luftgehalt im Frischbeton < 4 %, 4 – 6 % und > 6 %) sowie der Nachbehandlungsqualität. Abbildung 1 zeigt ein typisches Beispiel einer Straßenoberbetonrezeptur vor und nach der Prüfung.



*Abbildung 1: Probekörper vor und nach der Prüfung der Frost-Taumittel-Beständigkeit (W/B- Wert = 0,38)*

Zur Darlegung von Zusammenhängen zwischen den unterschiedlichen Einflussfaktoren und der Frost-Tausalzbeständigkeit erfolgte auf Basis der bereits vorliegenden Versuchsergebnisse die Beurteilung und Gegenüberstellung von W/B-Wert, Luftporenkennwerten, Nachbehandlung und Abwitterungserscheinungen. Ausgewählte Versuchsergebnisse über Zusammenhänge zwischen Abwitterung und Luftporenkennwert (L 300 und AF) sowie Nachbehandlungsqualität und Gesamtporosität können Abbildung 2 entnommen werden.

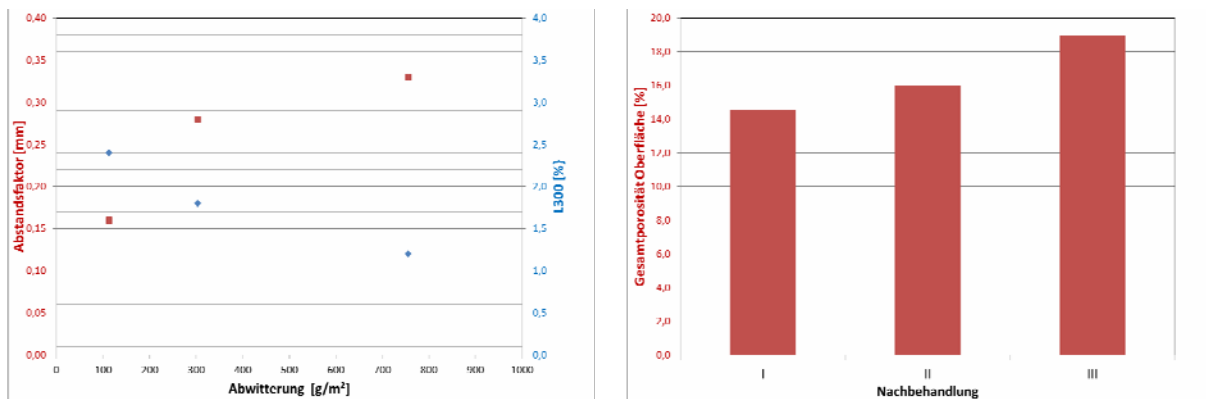


Abbildung 2: Ausgewählte Zusammenhänge zwischen Luftporenkennwerten (L 300 und AF) und Abwitterung sowie Gesamtporosität und Nachbehandlung (I gute Nachbehandlung, III schlechte Nachbehandlung)

Auf Basis der im Labor gewonnenen Erkenntnisse erfolgte ebenso die Beurteilung von tatsächlich geschädigten Autobahnabschnitten mit den gleichen Bestimmungsmethoden.

### Ausblick

Am Ende des Projektes (Berichtslegung Anfang 2014) sollen alle gewonnenen Erkenntnisse in einer Matrix dargestellt und Zusammenhänge zwischen Betonqualität und Gefügeschädigung aufgezeigt werden. Dadurch werden Aussagen getroffen in wieweit sich ungünstige Herstellungsparameter bzw. Abweichungen zu den definierten Vorgaben auf die Beständigkeit von Betondecken auswirken.

### Literatur:

- [1] ONR 23303 Prüfverfahren Beton – Nationale Anwendung der Prüfnormen für Beton und seiner Ausgangsstoffe, ASI Wien 2010
- [2] RVS 08.17.02- Technische Vertragsbedingungen Betondecken – Deckenherstellung, FSV Wien 2011

## Kolloquium 2013 Forschung & Entwicklung für Zement und Beton

### **Bohrpfahlbeton Untersuchungen zum Nachfließverhalten**

Die moderne Betontechnologie bringt Vorteile im Baufortschritt und der Machbarkeit von komplexen Bauvorhaben. Frisch- und Festbetonkennwerte können durch geeignete Wahl von Ausgangsstoffen und Betonzusammensetzung in scheinbar unendlichem Maße für das spezifische Einsatzgebiet optimiert werden. Durch den raschen Fortschritt und gleichzeitig ständig wechselnde Rahmenbedingungen (Einbaubedingungen, neue Betonzusatzmittel etc.) erhöht sich jedoch auch die Gefahr, dass die Optimierung einer bestimmten Eigenschaft eine andere negativ beeinflusst. Solch ungewünschte Nebeneffekte, die sich als Fehlstellen negativ auf das Bauwerk auswirken können, sind durch ständige Weiterentwicklung und begleitende, baupraktische Forschung weitgehend auszuschließen.

Moderne, weiche Betone (Konsistenzbereich F52 und F59) für Bohrpfahlwände oder Schlitzwände weisen im Vergleich zu herkömmlichen Betonen bezüglich Verarbeitbarkeit markant abweichende Eigenschaften auf und es kommt selbst bei nach konventionellen Prüfverfahren und Augenschein den Anforderungen entsprechenden Beton, zu Schäden im Bauwerk.

Ursachen für die Schäden sind einerseits das Absetzen des Betons durch Entmischungen beim Einbau und andererseits, insbesondere bei Bohrpfählen, offene Fugen im Bereich der Rohrwandung, die erhebliche Längenausdehnungen aufweisen können. Diese Hohlstellen in der Kontaktzone des Bohrpfahlbetons mit dem Nachbarbohrpfahl oder Boden sind meist auf ein mangelndes „Nachfließverhalten“ des Betons bei der Pfahlbetonierung zurückzuführen. Durch das alleinige Ziehen des Rohres und dem Betoneigengewicht (ohne gesonderte Verdichtungsmaßnahmen) ist bei ungeeigneter Betonzusammensetzung ein Nachfließen in den Ringspalt und/oder eine entsprechende Verteilung hinter die Bewehrung nicht sichergestellt, wodurch das beschriebene Schadensbild entsteht. Um diese Problematik aufzuklären wurde im Rahmen eines von der Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) geförderten Projektes umfangreiche Untersuchungen durchgeführt („Robuster Bohrpfahlbeton“, FFG-Projekt Nr. 835010).

Im Zuge des Forschungsprojektes wurde nach geeigneten Betonzusammensetzungen und Prüfmethode zur Vermeidung der beschriebenen Fehlstellen gesucht. Ein wesentlicher Punkt für die baupraktische Akzeptanz war eine unkomplizierte, rasche Prüfungsdurchführung auf der Baustelle.

Die untersuchten Betonzusammensetzungen umfassten ein weites Spektrum der in Österreich zur Anwendung kommenden Zusammensetzungen und Ausgangsstoffe. Variiert wurden unter anderen Bindemittel (Zementtyp; Zusatzstoff; Kombination; Hersteller), Gesteinskörnung (Rundkorn/Kantkorn/Gemisch; Größtkorn; Hersteller) und verwendete Zusatzmittel (Produkte mit unterschiedlicher chemischer Basis; Hersteller).



Diese unterschiedlichen Betonzusammensetzungen wurden mittels eigens entwickelten Bohrpfahlsimulationsgerätes im Labormaßstab auf ihr Nachfließverhalten beurteilt. Abbildung 1 zeigt zwei extreme Beispiele für das Nachfließverhalten bei der Prüfung mittels Bohrpfahlsimulationsgerät. Während beim linken Bild offensichtlich ein ausreichendes Nachfließverhalten gegeben ist, kann beim rechten Bild nur von unzureichendem Nachfließverhalten ausgegangen werden.



Abbildung 1: Darstellung des Nachfließverhaltens im Labormaßstab mittels Bohrpfahlsimulationsgerät

Aus den umfangreichen Ergebnissen der Bohrpfahlsimulationsversuche konnte schließlich mit der Höhe des Bohrpfahlstumpfes ohne Kontakt zur äußeren Rohrwandung ein guter Kennwert als Anhaltspunkt zur Identifikation von geeigneten oder ungeeigneten Betonzusammensetzungen ermittelt werden.

Auf Basis dieser Erkenntnisse wurden unterschiedliche Konsistenzbestimmungsmethoden auf ihre Aussagekraft zur Bestimmung der Nachfließfähigkeit untersucht. Folgende Prüfverfahren wurden angewandt:

- Ausbreitmaß gemäß ONR 23303:2010
- „Ausbreitfließmaß“ (entspricht dem Ausbreitmaß gemäß ONR 23303, jedoch ohne Klopfvorgang)
- Setzfließmaß gemäß ÖNORM EN 12350-8:2010
- Fließmaß gemäß ÖVBB-Richtlinie „Selbst- und Leichtverdichtbarer Beton“, Ausgabe 2012

Aufgrund der Versuchsergebnisse des Forschungsvorhabens ist die Bestimmung mittels Ausbreitfließmaß als am geeignetsten zur Bestimmung des Nachfließverhaltens anzusehen. Sie zeigt einerseits eine gute Korrelation mit den Ergebnissen der Bohrpfahlsimulationsversuche und den tatsächlichen baupraktischen Erfahrungen, und stellt andererseits ein Verfahren dar, welches mit dem in Österreich aufgrund der Ausbreitmaßbestimmung vorhandenen Gerät ohne wesentlichem Mehraufwand auch auf der Baustelle rasch durchgeführt werden kann.

Zusammenfassend können somit nachstehende Eigenschaften für die einfache Beurteilung eines für die Bohrpfahlherstellung geeigneten Betons mit ausreichendem Nachfließverhalten empfohlen werden:

- Grundsätzlich ist ein möglichst geringer Konsistenzverlust, geprüft mittels Ausbreitmaß oder Ausbreitfließmaß, über die gesamte Verarbeitungszeit anzustreben. Eine entsprechende Auswahl einer günstigen Bindemittelkombination ist daher essentiell. Die eventuell erforderliche Verwendung eines Verzögerers ist abzuklären.
- Zur Beurteilung des Nachfließverhaltens wird die Prüfung mittels Ausbreitfließmaß empfohlen. Auf Basis der Ergebnisse dieses Forschungsprojektes können folgende Grenzwerte (Mindestwerte) für das Ausbreitfließmaß, geprüft in einem Alter von 10 Minuten nach Wasserzugabe) als geeignet angesehen werden:
  - o Für Betone mit einem Ausbreitmaß von etwa 60 cm 10 Minuten nach Wasserzugabe (entspricht etwa einer Konsistenzklasse F52): ein Ausbreitfließmaß von mindestens 40 cm
  - o Für Betone mit einem Ausbreitmaß von etwa 65 cm 10 Minuten nach Wasserzugabe (entspricht etwa einer Konsistenzklasse F59): ein Ausbreitfließmaß von mindestens 50 cm.

Die Ergebnisse des Forschungsprojektes wurden bereits in der Überarbeitung der ÖBV-Richtlinie „Bohrpfahlbeton“ berücksichtigt um ehest bald eine praktische Umsetzung der Ergebnisse zu erreichen.



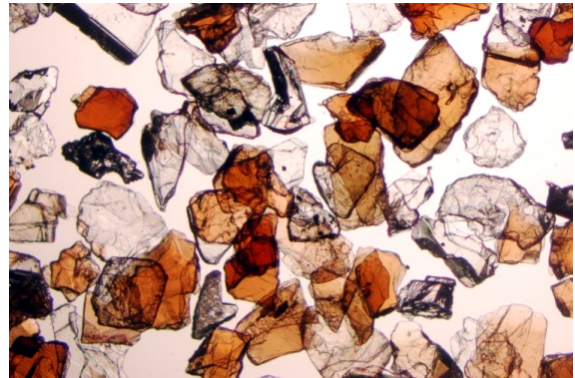
## Bestimmung des Glimmergehalts – Formtrenntisch

**DI Rene Stelzer**, ARGE Tunnelprüftechnik, Nievelt Labor, rene.stelzer@argetpt.at

**DI Guido Cresnik**, ARGE Tunnelprüftechnik, Materialprüfanstalt Hartl, guido.cresnik@argetpt.at

**Brigitte Pestitschek, MSc**, TPA Gesellschaft für Qualitätssicherung und Innovation, brigitte.pestitschek@tpaqi.com

**In der Gesteinskörnung vorhandene Schichtsilikate können die Betoneigenschaften in vielfältiger Weise beeinflussen.** Dazu zählen hauptsächlich der Wasser- und Fließmittelanpruch zur Erreichung der Verarbeitbarkeit, aber auch das Ansteifeverhalten und die Beeinflussung des Gehalts an künstlichen Luftporen. Außerdem werden die Gesteinsfestigkeit und die Festigkeit des Feinmörtels beeinflusst.



Es existieren folgende Methoden zur Bestimmung und Quantifizierung von Schichtsilikaten:

- Auszählverfahren (Dünnschliff) mit Polarisationsmikroskop
- Quantifizierung anhand RDA (Röntgendiffraktionsanalyse)
- Abtrennung durch Schwereflüssigkeit
- Formtrenntisch

Die Quantifizierung mit dem **Auszählverfahren anhand eines Streupräparat-Dünnschliffs** kann sehr zeitaufwendig werden, da die Genauigkeit mit der Anzahl der ausgezählten Partikel einhergeht (Probeninhomogenität, Statistik). Die Angabe erfolgt in Korn-% (nicht Masse-%).

Die **semiquantitative röntgenographische Mineralanalyse** mittels **RDA** (Röntgendiffraktionsanalyse) gem. ÖN B 4810 bietet die Möglichkeit zur Bestimmung der **Gesamtmineralogie** (auch an Gesamtproben). Eine Fehlerquelle bergen die verwendeten Auswerteparamter. Eine exaktere Quantifizierung des Mineralbestandes ermöglicht die zusätzliche geochemische Verrechnung der Elementoxidverteilung (RFA).

Die Abtrennung mittels **Schwereflüssigkeit** basiert auf einer Separation der Minerale durch unterschiedliche Kornformen und Dichten der Partikel. Der Glimmergehalt wird in feiner und grober Gesteinskörnung mittels Sink-Schwebe-Trennung in einer Schwereflüssigkeit bestimmt. Da besonders Minerale der Glimmergruppe Einschlüsse von Schwermineralen (zB Zirkone) oder Verwachsungen mit anderen Mineralen aufweisen, ist diese Methode schwierig. Weiters überschneiden sich die Dichten einzelner Minerale (Dichten: 2,5-3,3 g/cm<sup>3</sup>) was eine Separierung erschwert. Es werden teils gesundheitsschädliche Chemikalien benötigt, was einen Einsatz auf Chemielaboratorien beschränkt.

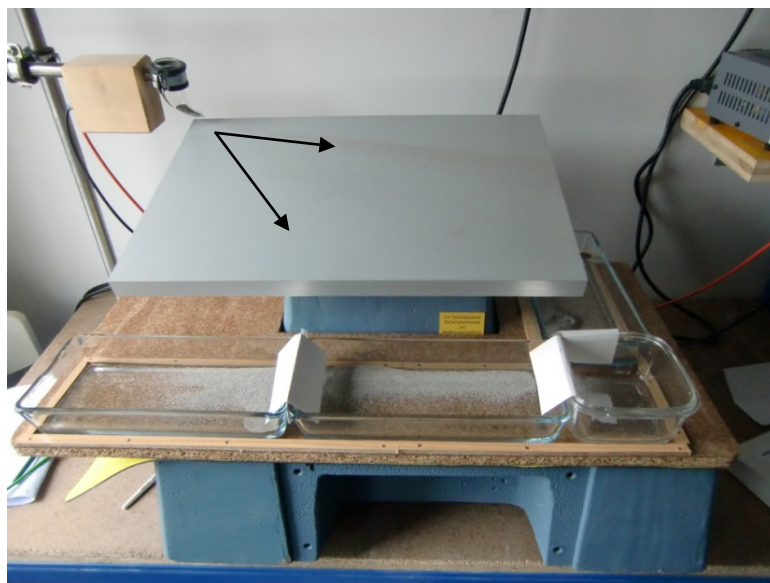
Der **Formtrenntisch** (Baujahr 1997) wurde ursprünglich zur Konzentration von Glimmern für Datierungszwecke basierend auf Änderungen der Isotopenverhältnisse angefertigt. Die Glimmerabtrennung mittels Formtrenntisch beruht auf **Unterschiede in der Kornform der Partikel**. Durch die Vibrationen und die Schrägstellung des Tisches rollen bevorzugt isometrische, gerundete Partikel (Schwerkraft) nach unten, tafelig und plattig ausgebildete Partikel wandern durch die Vibration jedoch horizontal. Die getrennten Fraktionen können zusätzlich unter dem Mikroskop qualitativ optisch beurteilt werden. Die Vorteile liegen in der Einfachheit, einem schnellen Untersuchungsergebnis und einer guten Wiederholbarkeit.

### Prüfverfahren:

Aus einer gebrochenen trockenen Gesteinsprobe (Sand zB 0/4) wird die Kornfraktion 125 – 250 µm abgesiebt. Für einen Einzelversuch werden durch Stichproben oder Probenteilung 2,5g entnommen.

Die Probe wird in einer vibrierenden Aufgabeevorrichtung mit Zufuhrtrichter eingebracht und von dieser langsam auf die Oberfläche des Formtrenntisches geriebelt. Die Amplitude der Probenaufgabe wird so eingestellt, dass die Partikel vereinzelt auf den Formtrenntisch fallen und sich nicht agglomerieren (die Körner dürfen sich beim Abrollen nicht wesentlich behindern). Der Regler ist während des Durchgangs anzupassen.

Die Partikel bewegen sich über die Oberfläche des Formtrenntisches und fallen je nach Kornform an einer bestimmten Stelle über die Tischkante. Unterhalb werden die Partikel in 3-4 exakt platzierten Schalen aufgefangen. Die schon getrennten Partikel werden in 1-2 Durchgängen nochmals aufgegeben, um eine präzise Trennung zu erhalten. Der Inhalt der Schalen wird gewogen.



Zur Ermittlung der Sortenreinheit wird die getrennte Probe mit dem Stereomikroskop oder Polarisationsmikroskop optisch untersucht und das Ergebnis der Trennung qualitativ bzw. semiquantitativ beurteilt um das Ergebnis zu präzisieren.

Die Auswertung erfolgt in M.-% unter Berücksichtigung der optischen Beurteilung.

Angaben zur Präzision:

Die Vergleichbarkeit wurde bei einem Ringversuch mit 5,5 abs.% bestimmt.

Ein Vergleich mit dem Verfahren RDA ergab eine Vergleichbarkeit von 5-11 abs.%.

Formtrenntisch Anwendung:

- ARGE Tunnelprüftechnik, Koralmtunnel
- Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Subsurface Engineering – Geotechnik und Untertagebau
- Uni Wien: Department of Lithospheric Research (nur Geochronologie)

Literatur

- [1] Lassnig K.: Verwendung von Tunnelausbruchsmaterial (2012), MU Leoben
- [2] ÖNORMEN B 3131, B 4810, B 4811



Dr.-Ing. Sebastian Palm, Dr.-Ing. Christoph Müller (VDZ gGmbH)

## **„Hydratationsgradbasierte Kennwerte zur Vorhersage der Dauerhaftigkeit von Beton“**

### **1 Allgemeines**

Das wesentliche Merkmal des Baustoffes Beton ist bei sachgerechter Zusammensetzung, Herstellung und Nachbehandlung neben der Festigkeit seine Dauerhaftigkeit. Werden Zemente verwendet, bei denen in Deutschland keine umfangreichen Erfahrungen hinsichtlich ihrer Dauerhaftigkeit vorliegen (z.B. CEM II/B-M, CEM II/B-LL oder CEM X), ist vor ihrem Einsatz zu prüfen, ob sie den Anforderungen genügen. Hierzu ist in Deutschland eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) erforderlich.

Die zunehmende Verwendung von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen, die bisher nicht für alle Expositionsklassen zugelassen sind, führt zu einer Zunahme von Dauerhaftigkeitsprüfungen im Vorfeld von Zulassungsverfahren. Nachteilig an diesen Prüfungen sind ihre Dauer und der damit verbundene finanzielle Aufwand. Könnte vor der eigentlichen Dauerhaftigkeitsprüfung mit einfachen Kennwerten ermittelt werden, ob ein Zement geeignet erscheint, diese Prüfung zu bestehen, können Kosten bei der Entwicklung neuer Zemente eingespart werden. Die Entwicklung solcher Kennwerte ist Ziel eines von der VDZ gGmbH und der Technischen Universität Clausthal durchgeführten AiF-Forschungsvorhabens.

### **2 Entwicklung von Kennwerten**

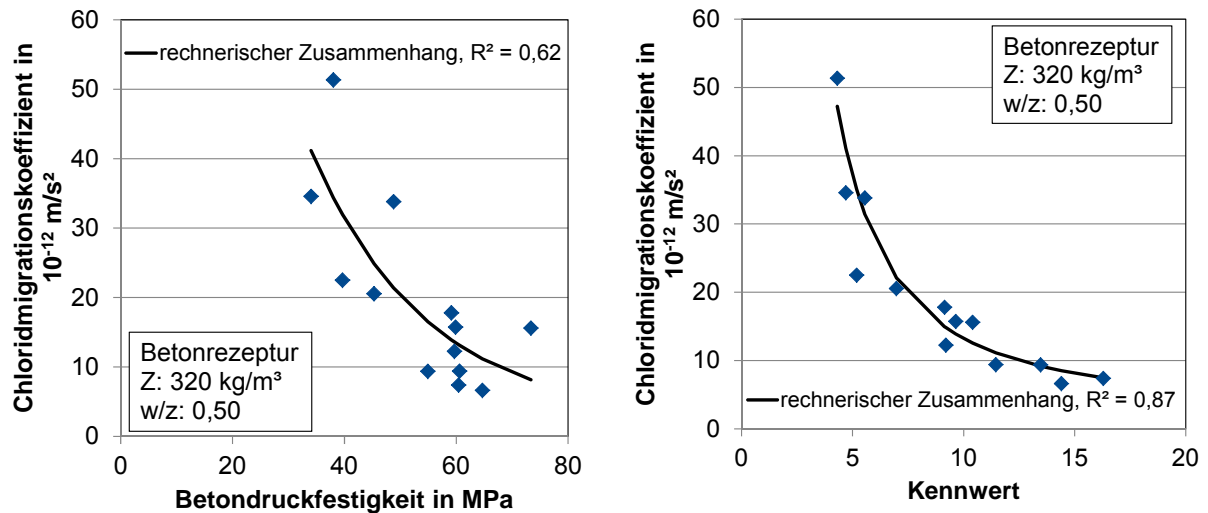
In einer Dissertation [1] wurden Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen hergestellt. Unter anderem konnte ein Kennwert (hydratationsgradbasierter Wasserzementwert, HWZ) definiert werden, der mit der Mörteldruckfestigkeit dieser Zemente korreliert ( $R^2 = 0,92$ ). In diesen Kennwert fließen derzeit der Hydratationsgrad des Zements zum Zeitpunkt der Festigkeitsprüfung, der Anteil des Zements im Mörtelsystem sowie die zugegebene Wassermenge ein.

Es stellte sich nun die Frage, ob mit einem solchen Kennwert in einer modifizierten Form auch Rückschlüsse auf die Dauerhaftigkeit von Betonen getroffen werden können. Für die Untersuchungen wurden Labor- und Werkzemente nach DIN EN 197-1 bzw. teilweise auch Zemente mit Zusammensetzungen außerhalb dieser Norm mit den Hauptbestandteilen Klinker, Kalkstein, Hüttensand und Flugasche verwendet. Die Betone wurden jeweils gemäß den Vorgaben des in Deutschland üblichen Zulassungsverfahrens zusammengesetzt. Da die meisten Schadreaktionen durch das Porensystem im Beton wirken, wurden neben dem Hydratationsgrad aus der Porengrößenverteilung ermittelte Parameter sowie ggf. der Luftporenanteil im Frischbeton in den Kennwerten berücksichtigt. Für die verschiedenen Dauerhaftigkeitsparameter (z.B. Abwitterung im CDF-, CIF- und Würfelverfahren gemäß DIN EN 12390-9, Chlorideindringwiderstand gemäß [2]) wurden verschiedene Kennwerte definiert.

In **Bild 1** ist beispielhaft der Zusammenhang zwischen dem Chlorideindringwiderstand nach 35 Tagen und der zugehörigen 28-Tage-Betondruckfestigkeit (links) bzw. einem hydratationsgradbasierten Kennwert (rechts) dargestellt. Der Kennwert enthält die Parameter „Hydratationsgrad des Zementsteins nach 7 Tagen“ sowie einen Porositätsterm (kumulierte Porosität 100 µm bis 0,02 µm des Normmörtels). Für Wasserbauwerke gemäß [2] liegt der Grenzwert des Chloridmigrationskoeffizienten bei  $10 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ , im Zulassungsverfahren gilt in Deutschland ein Grenzwert von  $25 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ . Insbesondere im Bereich um etwa 60 MPa liefert die Betondruckfestigkeit keine belastbaren Rückschlüsse auf den Chlorideindringwi-

derstand. Auch eine hohe Druckfestigkeit  $>70$  MPa garantiert keinen Chloridmigrationskoeffizienten  $\leq 10 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ . Der Kennwert zeigt hierbei einen deutlich besseren Zusammenhang.

Einfach zu bestimmende Kennwerte von beliebig zusammengesetzten Zementen auf Basis von Hydratationsgraden und Normmörtelporositäten lassen nach den bisher vorliegenden Ergebnissen deutliche Aussagen zur Dauerhaftigkeit von Betonen mit diesen Zementen zu. Die gezeigten Zusammenhänge müssen jedoch in weiteren Untersuchungen bestätigt werden. Allgemein gültige Aussagen sind zum gegenwertigen Stand des Forschungsvorhabens noch nicht möglich.



**Bild 1** Zusammenhang zwischen dem Chlorideindringwiderstand und der Betondruckfestigkeit (links) bzw. einem hydratationsgradbasierten Kennwert (rechts)

### 3 Literatur

- [1] S. Palm, Optimierung der Raumauffüllung und der Komponentenverteilung von Multikompositzementen, Dissertation, TU Clausthal, 2009.
- [2] Bundesanstalt für Wasserbau, Chlorideindringwiderstand von Beton, BAW-Merkblatt "Chlorideindringwiderstand", 2004.

# Infrarotspektroskopie für die Zementindustrie und Zementforschung: Produktentwicklung, Prozessanalytik und Qualitätssicherung

Jürgen Kasberger, Robert Holzer, RECENDT GmbH

## Einleitung

Schwingungsspektroskopische Messverfahren zählen zu den vielseitigsten Analytikmethoden sowohl für die industrielle Prozessüberwachung als auch Laboruntersuchungen. Durch die Anregung innerer molekularer Strukturen mittels elektromagnetischer Strahlung (von Terahertz bis Infrarotstrahlung) und der Möglichkeit, diese in einem breiten Wellenlängenbereich über optische Fasern zu führen, werden chemischen Informationen der meisten Produktionsprozesse direkt zugänglich. Neben der NIR (Nah-Infrarot)-Spektroskopie, welche aufgrund der technischen Voraussetzungen am besten für den industriellen Einsatz geeignet ist, bieten auch verwandten Bereiche wie MIR-Spektroskopie (im Mittleren Infrarot) oder Raman- und Terahertz (THz)-Spektroskopie ein breites Anwendungsfeld. Alle Technologien zielen auf eine Bestimmung der chemischen Zusammensetzung von untersuchten Proben ab, wobei jede Technologie unterschiedliche Vor- und Nachteile sowohl aus analytischer Sicht als auch in Bezug auf Ihre praktische Anwendbarkeit im Labor oder im Produktionsprozess hat.

## Schwingungsspektroskopie in der Zement- und Betonherstellung

Einsatzmöglichkeiten der schwingungsspektroskopischen Technologien, erstrecken sich im Produktionsprozess von der Qualitätssicherung in der Ein- bzw. Ausgangskontrolle über die reine Prozessüberwachung bis hin zur optimalen Prozesssteuerung. Auch Teile der für Umweltschutzaufgaben nötigen Analytik können damit sehr kostengünstig abgedeckt werden.

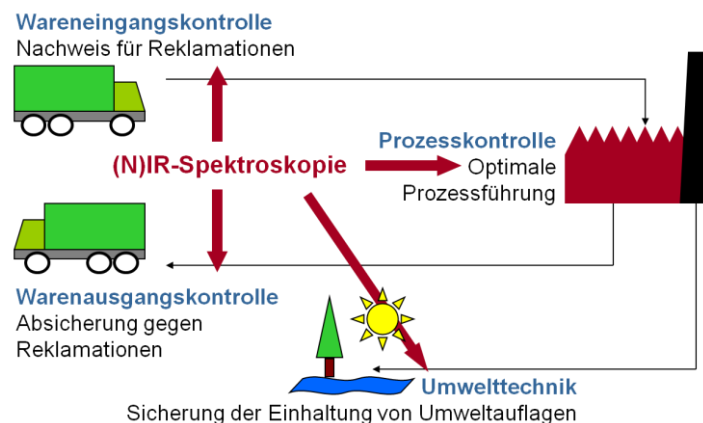


Abbildung 1: Übersicht Einsatzgebiete für schwingungsspektroskopische Prozessüberwachung in der industriellen Produktion.

Für die Prozessüberwachung im industriellen Umfeld ist die NIR-Spektroskopie die am häufigsten eingesetzte Methode. Aufgrund des genutzten Wellenlängenbereichs können mit entsprechenden Messkonfigurationen praktisch alle relevanten Produktionsprozesse zugänglich gemacht werden. Hierfür werden optischen Fasern eingesetzt, welche die NIR-Strahlung von der Messstelle zu einem hochsensitiven Prozessspektrometer führt. Für eine ausreichende Empfindlichkeit der Messkonfiguration werden für Prozessüberwachungssysteme meist FT (Fourier Transform) NIR-Prozessspektrometer verwendet. In Kombination mit entsprechender Sondentechnologie sind damit chemische Reaktionen von festen und flüssigen Prozessen hervorragend überwachbar.

Als typisches Anwendungsgebiet in der Prozessüberwachung wurde in [1] die Zusammensetzung von Zementrohmaterialien untersucht. Die hier eingesetzte DRIFT (Diffuse Reflectance Infrared Fourier Transform Spectroscopy) Technologie ermöglicht durch flexible Konstruktion des Messkopfes eine einfache Adaption des Messsystem an die örtlichen Gegebenheiten zur Realisierung einer Inline-Messung. Exemplarisch ist eine DRIFT-Konfiguration, welche bei RECENTDT für ein anderes Anwendungsfeld entwickelt wurde, in Abbildung 2 dargestellt.

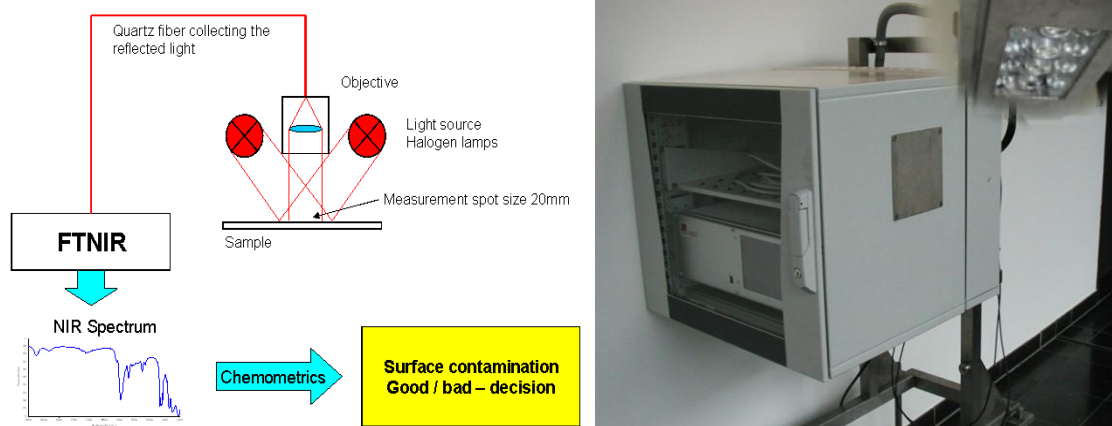


Abbildung 2: Skizze DRIFT-Konfiguration (links) und Ausführung als industrietaugliches Setup (Spektrometer i-RED Infrarotsysteme GmbH).

Neben der Realisierung des Messsystems spielt in der NIR-Prozessüberwachung die Chemometrie eine zentrale Rolle. Die im NIR-Bereich charakteristische Überlagerung von Grundschwingungen (im MIR-Bereich) erfordert eine Kalibrierung des Systems sowie eine mathematische Auswertung der NIR-Spektren.

Abhängig von der gegebenen Anforderung an das Überwachungssystem können verwandte Technologien eine interessante Alternative zur NIR-Prozessüberwachung darstellen [2], wobei spektrale Messmethoden, welche im Fingerprintbereich arbeiten, direkte Rückschlüsse auf Molekülstrukturen ermöglichen [3],[4],[5]. Abhängig von der jeweiligen Anwendung kann hier beispielsweise die MIR-ATR (attenuated total internal reflection)-Konfiguration [6] oder die Raman-Spektroskopie eine interessante Alternative bieten [7], [8]. Auf hinsichtlich Empfindlichkeit (z.B. tunable diode laser absorption spectroscopy) oder Zugänglichkeit von (z.B. stand-off Raman) Messpunkten bietet die schwingungsspektroskopische Analytik zahlreiche interessante Möglichkeiten für die Zementherstellung und dessen Weiterverarbeitung zu Beton. Durch die Ausweitung des zugänglichen Spektralbereichs können mit der relative jungen Methoden der THz-Technologie [9] bisher unzugängliche Information gemessen werden.

### Zusammenfassung

Die FTNIR-Spektroskopie ist als etablierte Methode in der Prozessüberwachung eine robuste Messmethode mit geringen Wartungskosten und bietet aufgrund des Messprinzips folgende Vorteile:

- berührungslos und zerstörungsfrei
- kurze Messzeiten (mehrere Messungen pro Sekunde)
- hohe Inlinefähigkeit
- keine Probenvorbereitung nötig

Zu den Einsatzbereichen zählen:

- Physikalische und chemische Charakterisierung von Flüssigkeiten, von Schichten (Dicke, Zusammensetzung, ...) und von Oberflächen auf Bulk-Materialien (Papier, Kunststoff, Stahl, Zement...)
- Messung von Prozessparametern (Feuchtigkeit, Homogenität,...)
- Echtzeitüberwachung von chemischen Reaktionen
- Inline-Prozessanalytik, aber auch Laboranalytik

Neben der etablierten Methode der NIR-Spektroskopie haben die Entwicklungen der letzten Jahre einige spektroskopischen Messmethoden etabliert, welche für spezielle Anforderung von großem Interesse sein können.

#### **Referenzen:**

- [1] S. Müller, Ch. Zwicky, L. Blahous, Near-infrared (NIR) on-line analysis for coarse-grained raw materials, ZKG INTERNATIONAL No. 4-2011.
- [2] A. Brook, E. Ben-Dor, Reflectance spectroscopy as a tool to assess the quality of concrete in situ, Journal of Civil Engineering and Construction Technology, Vol. 2(8), 2011.
- [3] R. Ylemen, U. Jäglind, Carbonation of Portland Cement Studied by Diffuse Reflection Fourier Transform Infrared Spectroscopy, International Journal of Concrete Structures and Materials Vol.7 (2), 2013.
- [4] R. Ylemen, U. Jäglid, B. Steenari, I. Panas, Early hydration and setting of Portland cement monitored by IR, SEM and Vicat techniques, Cement and Concrete Research, Vol. 39, 2008.
- [5] T. Hughes, C Methven, T. Jones, S. Pelham, Ph. Fletcher, Ch. Hall, Determining Cement Composition by Fourier Transform Infrared Spectroscopy, Advn Cem Bas Mat Vol. 2, 1995.
- [6] K. Unterderweide, FT-IR spectroscopy for operational process and quality control of mineral building materials, ZKG INTERNATIONAL No. 4-2010.
- [7] G. Renaudin, R. Segni, D. Mentel, J. Nedelec, F. Leroux, Ch. Taviot-Gueho, A Raman Study of the Sulfated Cement Hydrates: Ettringite and Monosulfoaluminate, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.5, 2007.
- [8] S. Peskova, V. Machovic, P. Prochazka, RAMAN SPECTROSCOPY STRUCTURAL STUDY OF FIRED CONCRETE, Ceramics – Silikáty, Vol. 55, 2011.
- [9] Ch. Neese, I. Medvedev, G. Plummer, A. Frank, Ch. Ball, F. De Lucia, Compact Submillimeter/Terahertz Gas Sensor With Efficient Gas Collection, Preconcentration, and ppt Sensitivity, IEEE Sensors Journal, Vol. 12, 2012.



# Möglichkeiten für Baustoffuntersuchungen mit dem Morphologi G3-ID

A. Schneider, A. Marcini, J. Steigenberger; VÖZ  
A. Erker: BTI (Bautechnisches Institut)

Das Morphologi G3-ID ist ein vollautomatisches System zur mikroskopischen Untersuchung von Korneigenschaften (Korngröße, Kornform von 0.5  $\mu\text{m}$  bis 3 mm, Oberflächeneigenschaften), welches in einem Kooperationsprojekt von einigen ACR-Mitgliedern mitfinanziert wurde. Das Neue ist die Implementierung eines Raman-Spektrometers, womit sowohl chemische als auch physikalische Charakteristika von einzelnen Partikeln im mikroskopischen Maßstab bestimmt werden können. Dieser Beitrag stellt die neuen Möglichkeiten, die das Gerät für die Baustoffforschung eröffnet, dar.



Abb. 1: Morphologi G3-ID von Fa. Malvern

## Fragestellungen hinsichtlich Partikelformen – Morphologische Untersuchungen

Viele pulverförmige Produkte sind Gemische. Üblicherweise werden einzelne Komponenten nur vor dem Mischvorgang charakterisiert. Folgende Fragestellung kommt in der Praxis öfters vor:

- Ändert sich die Größe der Partikel während des Mischvorgangs?
- Ist jede Komponente im richtigen Ausmaß vorhanden?
- Welche Einzel- / Gesamtverteilungen der Korngrößen entstehen?

Alle diese Fragestellungen können durch Messungen der Probe mit Morphologi G3-ID beantwortet werden.

Einige morphologische Daten, die das Gerät neben Partikelgrößenverteilung statistisch auswertet sind:

- Partikelgröße
- Partikelform
- Partikel 'Kontur' (Umfang)

## Analysen einer Zementprobe

Optimale Dispersion der Zementprobe wird mit Trockendispersion (6  $\mu\text{m}$  Folie) erreicht. Für die Morphologi Untersuchungen wurde die Messung mit 20-facher Optik und einer Anzahl von 100.000 Partikeln festgelegt.

Für die chemische Charakterisierung einer Probe werden zurzeit 1000 Spektren aufgenommen und ausgewertet. Nach dem Abschluss der Methodenentwicklung und deren Optimierung wurden einige Zementproben mit Morphologi G3-ID analysiert.

Es wurden zwei Zementproben Typ CEM II/A-LL für die Analyse herangezogen. Eine Probe aus Werksbetrieb und eine Probe aus Labormischung. Bei beiden Proben handelte es sich um eine Mischung aus CEM I und Kalkstein. Bei der Probe aus Betrieb wurden die Komponenten gemeinsam vermahlen und bei der Probe aus Labor wurden die Komponenten zuerst getrennt vermahlen und danach vermischt.

Als erstes wurde die Partikelverteilung beider Mischungen bestimmt. Hier zeigten beiden Proben keine Unterschiede bei der Gesamtverteilung der Partikel. Durch die chemische Analyse von 1000 Partikeln und Zuordnung der Spektren zu den Partikeln konnte die Partikelverteilung der einzelnen Komponenten in den beiden Mischungen bestimmt werden. Wie aus dem Diagramm zu sehen ist, sind die Feinheiten der Komponenten bei den zwei Mischungen unterschiedlich. Während bei der Probe aus Betrieb der CEM I-Anteil die gröbere Fraktion darstellt, repräsentiert bei der Laborprobe CEM I die feinere Fraktion (Abb.2)

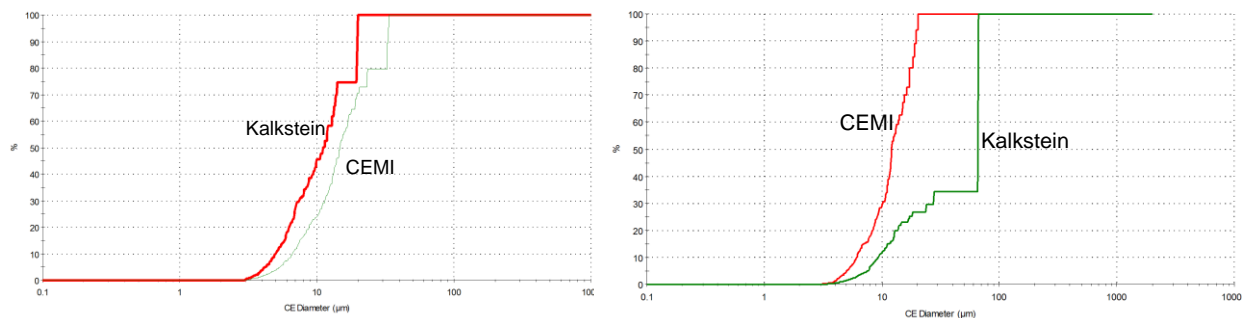


Abb.2: Rechts: Verteilung der Komponenten der Probe aus Labormischung, Links: die Probe aus Betrieb

## 6. Zusammenfassung

Es ist erstmalig möglich, die Feinheit und Partikelverteilungen der einzelnen Komponenten in einer Mischung festzustellen. Diese Zusatzinformation kann in vielen Bereichen der Zementproduktion und schließlich Betonqualität von Nutzen sein.

Es ist VÖZ in der kurzen Zeit gelungen, Morphologi G3-ID für einige Fragestellungen aus Betrieb und Qualität zielgerecht einzusetzen. Weitere Forschungsthemen bzw. einzelne Fragestellungen in unmittelbare Zukunft sind denkbar. Einige Beispiele aus der grundsätzlichen Fragestellung der Zementindustrie weltweit:

- Wissenszuwachs über die Anzahl, Zusammensetzung und Beschaffenheit der feineren Anteile eines Zementes
- Vergleich der unterschiedlichen Mahlaggregate im Zusammenhang mit Effizienz (Energie)
- Untersuchung der Rohmehlzusammensetzung gegliedert nach Korngrößen zur Optimierung der Rohmehlmahlung im Hinblick auf die Brennbarkeit
- Optimierung der Partikelformen hinsichtlich Produkteigenschaften, wie Festigkeit oder Rheologie
- Optimierung der Zusammensetzungen der so genannten „Neuen Zemente“

Für weitere Fragestellungen und Ideen können Sie mit Fr. Dr. Ameneh Schneider Kontakt aufnehmen (schneider@voezfi.at).

# **Einfluss von Zementparameter auf das rheologische Verhalten des Zementleims**

Ameneh Schneider, M. Peyerl, Smartminerals GmbH  
H. Bruckner, TU Wien

Derzeit werden rheologische Untersuchungen zur Beurteilung der Interaktion der regional unterschiedlichen Ausgangsstoffe (Zement und Gesteinskörnung) mit den Fließmitteln kaum durchgeführt. Die im Rahmen dieses Forschungsprojektes geplanten Versuche und Beurteilungen sollen helfen, Auswirkungen unterschiedlicher Betonzusatzmittel auf die rheologischen und somit verarbeitungstechnischen Eigenschaften von Zementleim bzw. Beton mit den in Österreich üblichen Ausgangsstoffen aufzeigen.

Ziele der Untersuchungen sind einerseits, den Einfluss von Zementhauptbestandteilen wie Hüttensand und Kalkstein auf die Wirkung der Fließmittel (abhängig von der jeweiligen PCE-Molekülstruktur) zu ermitteln, andererseits den Einfluss der Variationen von Klinkerparametern sowie Sulfatträgern auf der die Wirkungsweise der unterschiedlichen PCE-Moleküle darzustellen. Damit können Kenntnisse über Stoffparameter für ein optimales Zusammenwirken von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen und PCE-Fließmitteln erweitert und für die wesentlichen, am Bauprozess Beteiligten (Zement-, Zusatzmittel- und Betonproduzenten, Betonanwender) dargestellt werden.

Die Untersuchungen wurden mit einem Rotationsrheometer, Viskomat NT durchgeführt. Mit dieser Methode sind rheologische Parameter wie Viskosität, Scherwiderstand, Fließgrenze nach Bingham Model berechnet. Zusätzlich werden durch Sättigungskurven die maximal zulässigen Fließmittelzugaben ermittelt.

Abhängig von den ausgewählten Zementen sind nachstehende Einflussparameter beurteilt:

1. Feinheit der Zemente (spezifische Oberfläche, Kornzusammensetzung)
2. Zusammensetzung von Sulfatträger
3. Alkalien im Zement bzw. lösliche Alkalien im Porenwasser
4. Einige Parameter in Klinkerproduktion wie  $C_3A$ -Gehalt
5. Zumahlstoffe (z.B. Kalkstein-, Hüttensandgehalt)

In diesem Beitrag werden ausgewählte Ergebnisse präsentiert

## **Einfluss des $C_3A$ -Gehaltes im Klinker**

Für diese Untersuchungen wurden folgende zwei Zemente zur Verfügung gestellt:

- CEM I 42,5 R/HS ( $C_3A$ -frei)
- CEM I 42,5 R ( $C_3A$ -hältig)

Die restlichen Zementparameter sind gut vergleichbar. Abbildung 1 zeigt die Fließkurve der beiden Zemente für 20 Minuten.

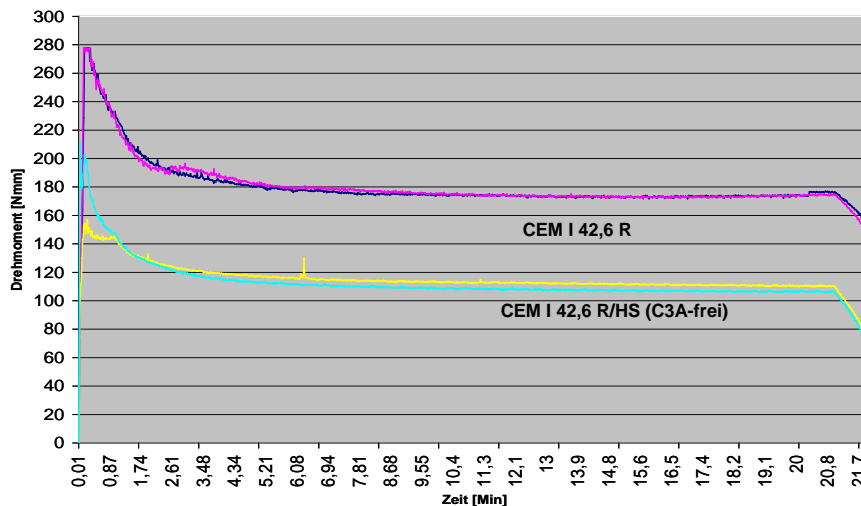


Abb. 1: Vergleich der Fließkurven

Der Einfluss des  $C_3A$ -Gehalts ist hier eindeutig zu sehen. Der  $C_3A$ -freie Zement weist um ca. 30% niedrigere Drehmomente auf als der  $C_3A$ -haltige Zement.

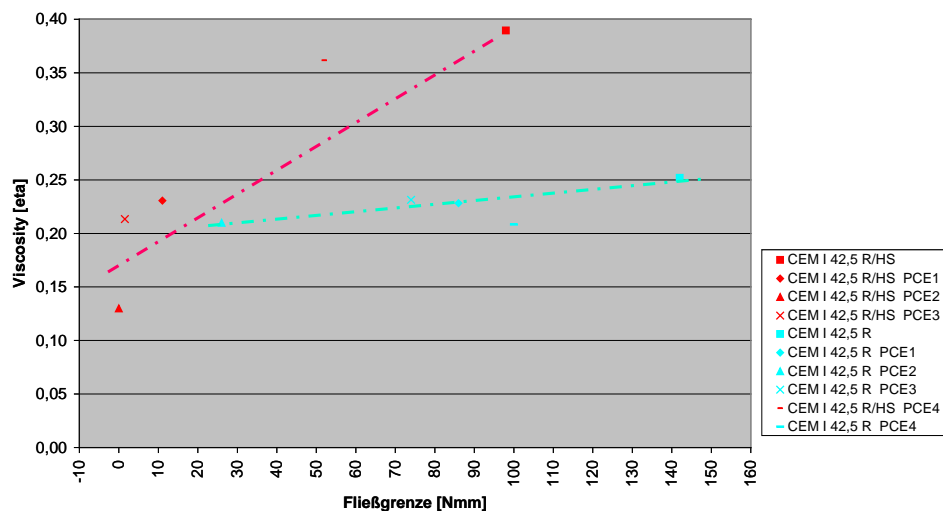


Abb. 2: Änderungen der Plastische Viskosität und Fließgrenze nach Zugabe von 4 PCE-Fließmitteln

Abbildung 2 stellt die ausgewertete plastische Viskosität und Fließgrenze für die beiden Zemente nach Zugabe von 0,2 % der jeweiligen PCE dar. Der  $C_3A$ -Gehalt ändert die Ausgangswerte (ohne PCE-Zugabe) der zwei Zementleime sehr stark. Eine interessante Erkenntnis, die in Praxis von Bedeutung sein kann, ist, dass die Wirkung aller untersuchten PCEs auf die Viskosität und Fließgrenze bei einem  $C_3A$ -freien Zementleim (blaue Kurve) moderater sind als bei einem  $C_3A$ -haltigen (rote Kurve).

**Fazit:** Rheologische Untersuchungen ermöglichen die Beurteilung der Kompatibilität und Inkompatibilität eines Zementes mit einem bestimmten Fließmittel.

# Pore structure and microstructure analysis of G-Oil Well cement cured under higher hydrothermal conditions

Martin T. PALOU<sup>1,2</sup>, Vladimír Živica<sup>2</sup>, Tomáš Ifka<sup>2</sup> and Lubomír BÁGEL<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Chemistry, Brno University of Technology, Purkyňova 118, 612 00, Brno, Czech Republic

<sup>2</sup> Institute of Construction and Architecture, Slovak Academy of Sciences, Dúbravská 9, 845 03 Bratislava 45, Slovak Republic

Cements used for casing oil-wells are exposed to steam environment with temperature exceeding 120 °C. Subjecting hydration of G Oil well cement to higher temperatures leads to undesirable deterioration of pore structure because tobermorite undergoes a number of transformation and reactions, thereby causing breakdown of cement paste structure and consequent lost in its load-bearing capacity, structural cracking. G Oil well cement has been cured under standard (G0) and two hydrothermal conditions with different steam pressures and temperatures (G0.3 -0.3 MPa/150 °C, G1.3 -1.2 MPa/200°C). Compressive strength, pore structure parameters, microstructure and hydrated products were evaluated after 7 days curing by using SEM, MIP and Simulated TGA/DSC. Obtained results showed that 7 days aged sample cured under standard conditions has the highest compressive strength with compact pore structure and hydrated products similar to those found after hydration of Ordinary Portland cement. With increasing temperature and pressure from standard conditions (25 °C, 10125 Pa) to hydrothermal ones (150 °C and 0.3 MPa, 200 °C and 1.2 MPa), compressive strength has drastically decreased from 77.5±2.0 MPa to 20.5±1.0 MPa due to the transformation of original hydrated products (C-S-H) to crystallized  $\alpha$ -C<sub>2</sub>S<sub>H</sub> and C<sub>6</sub>S<sub>2</sub>H<sub>3</sub>. The crystallization has led, under hydrothermal curing, to the increase of permeability and pore structure depletion.

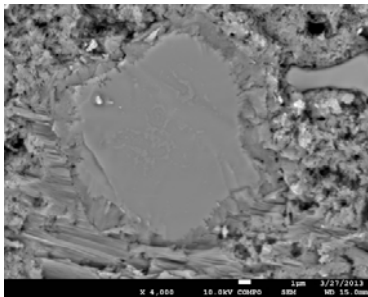


Fig.1. Standard curing condition: unhydrated C<sub>3</sub>S surrounded by C-S-H gel

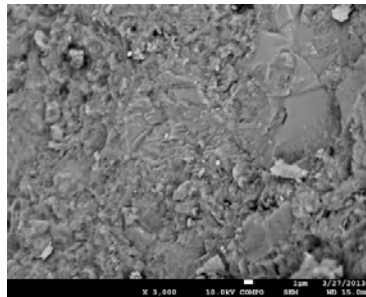


Fig.2. Sample cured at 0.3 MPa: unhydrated C<sub>3</sub>S surrounded by C-S-H gel

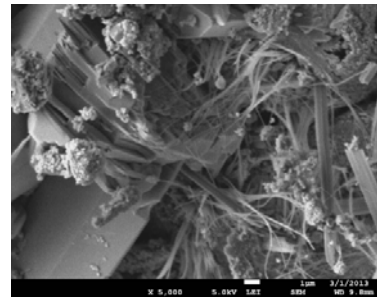
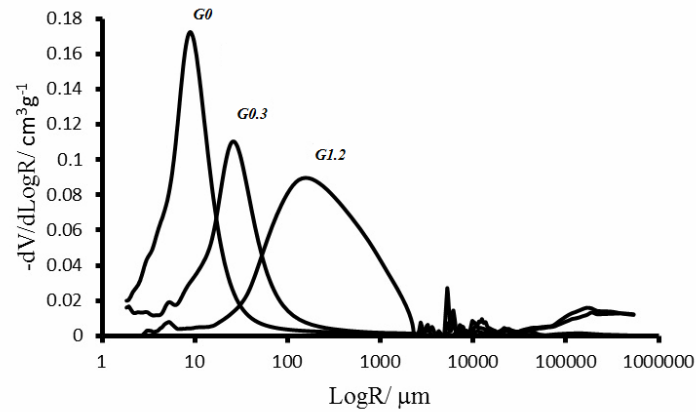


Fig.3. Sample cured at 1.2 MPa: Porous microstructure composed of C<sub>6</sub>S<sub>2</sub>H<sub>3</sub> resulting from the transformation of C-S-H gel





The pore size distribution (PSD) of cement pastes cured under different hydrothermal regimes is depicted in Fig. 4. The effect of hydrothermal effect is evidenced by the intensity and position of the peak, by the length and bimodal characteristic of PSD. With increasing temperature/pressure, curves of PSD are displaced towards higher pore size. This is the demonstration of hydrothermal curing on the pore structure of G-Oil well cement paste

**Acknowledgement:** This article has been produced with the financial assistance of the European Regional Development Fund (ERDF) under the Operational Programme Research and Development/Measure 4.2 and with financial support from VEGA No. 1/0064/12.

## „Concrete Design Award“ – Betonmöbel aus Textilbeton

Im Rahmen des Concrete Design Awards, eines Entwurfswettbewerbes zur Neugestaltung der Grillmöbel auf der Donauinsel, entstand die Grillstation „Donauwelle“. Das Projekt verbindet eine zeitgemäße Entwurfsidee mit einer Anwendungsmöglichkeit der innovativen Baustoffkombination Textilbeton.

Ausgehend von der archaischen Urform der Lagerfeuerstelle am Boden, greifen wir die Idee des Feuers als zentrales Element wieder auf. Rund um diesen zentralen Punkt bildet sich eine Gruppe von 8 bis 10 Personen aus, allesamt mit Blickrichtung zur Feuerstelle. Gemeinschaft als oberstes Gestaltungsprinzip - dazu hält der Philosoph Georg Simmel fest:

**„Von allem nun, was den Menschen gemeinsam ist, ist das Gemeinsamste: daß sie essen und trinken müssen.“**

In dem Projekt *DONAUWELLE* werden Geschichte und Tradition mit den heutigen Ansprüchen nach Funktionalität, Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit verschränkt.



Um diese Entwurfsidee mit den geplanten dünnen Plattenstärken umsetzen zu können bedarf es einer Alternative zur konventionellen Stahlbewehrung. Die Verwendung von textilen Bewehrungen aus Hochleistungsfasern ist ein möglicher Lösungsvorschlag. Weil die Abmessungen der hochfesten Fasern im Millimeterbereich liegen und damit mindestens eine Größenordnung unter der normaler Betonbewehrung und weil die Fasermaterialien nicht vor Korrosion geschützt werden müssen, lassen sich Bauteile und Bauwerke aus Beton mit bisher unerreichter Leistungsfähigkeit und Schlankheit realisieren.

Die mechanischen Eigenschaften von Textilbeton gleichen aufgrund ähnlicher Trag- und Versagensmechanismen weitgehend denen des Stahlbetons.

Abbildung 1 zeigt ein Spannungs-Dehnungs-Diagramm aus einem einaxialen Zugversuch. Bei diesem sog. Dehnkörperversuch wurde eine scheibenförmige Probe mit den Abmessungen von 720 mm (Länge) x 100 mm (Breite) x 20 mm (Dicke) getestet. Das duktile Tragverhalten von Textilbeton bringt wesentliche Vorteile für die Dauerhaftigkeit der Möbel mit sich.

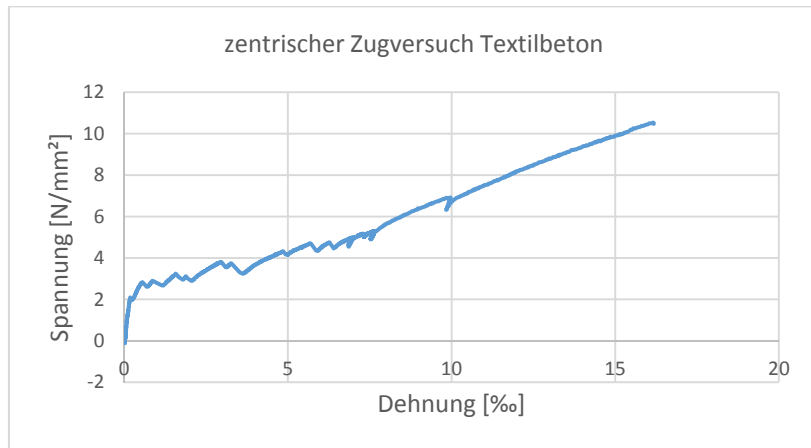


Abbildung 1 Spannungs- Dehnungsdiagramm Textilbeton

Beton hat die positive Eigenschaft, dass die Oberfläche genau ein Spiegelbild der verwendeten Schalung bildet. Ist diese möglichst glatt wird daraus folgend auch die Betonoberfläche möglichst glatt. Weist die Schalung Fehler auf so werden diese direkt auf den Beton übertragen. Bei diesem Projekt möchten wir diese Eigenschaft zugunsten einer guten Haptik nutzen. Der direkte Kontakt bei einer Benutzung der Möbel mit einer glatten und kalten Betonfläche soll vermieden werden. Um dem Abhilfe zu schaffen wird die Schalung nicht durch eine glatte Schalplatte allein gebildet, sondern mit einer textilen Auskleidung. Der Beton nimmt die leicht angeraute „weiche“ Struktur des Textils an und lädt ein die spezielle Oberfläche für das Material Beton zu berühren. Der Benutzer wird eingeladen das Möbel auszuprobieren und es zu berühren und sich hinzusetzen.

Deshalb wird die Schalung also mit einem Textil ausgekleidet und schafft somit die gewünschte Oberfläche an den körperberührenden Teilen.

Projekt

## >>> GrünStadtKlima

Optimierung des städtischen Klimas und Wasserhaushalts

### Einleitung

Der fortschreitende Klimawandel bedingt eine Zunahme von Wetterextremen wie beispielsweise Hitzewellen und Starkregenereignissen. Städte sind von diesen Wetterextremen überproportional betroffen.

Das Forschungsprojekt GrünStadtKlima griff diese Thematik auf und untersuchte die Wirkung unterschiedlicher urbaner Flächenbefestigungen hinsichtlich ihrer mikroklimatischen Effekte, Abflussverhalten und Schadstoffelimination.

### Projektbeschreibung

Im Jahr 2010 startete das Projekt GrünStadtKlima. Knapp 30 Partner aus Wirtschaft und Forschung schlossen sich zusammen, um die Wirkungen von begrünten Bauwerksoberflächen und Wegebefestigungen auf das urbane Klima und den Wasserhaushalt zu untersuchen. Der Arbeitsgruppe Wege gehörten neben dem Forum Qualitätspflaster (FQP) und dem Verband Österreichischer Beton- und Fertigteilwerke (VÖB) sowie Fa. Steinbauer Development an auch die Forschungsinstitute für Meteorologie, Siedlungswasserbau und Ingenieurbiologie und Landschaftsbau der Universität für Bodenkultur Wien an.

Gemeinsam wurde die Errichtung von Versuchsanlagen für einen mehrjährigen Feldversuch erarbeitet und ein Untersuchungsdesign entwickelt.

Im Frühjahr 2011 konnte mit dem Bau der Versuchsanlage (nach RVS 08.03.01, RVS 08.15.01, RVS 08.18.01) begonnen werden.

Insgesamt wurden 9 unterschiedliche Oberflächenbefestigungen für den Feldversuch gewählt:

- Gitterstein 100/100/30 mit Recyclingmaterialfüllung 0/32
- Betonstein 20/20 mit Drainfuge 2/8
- Betonstein 21/17 mit Normfuge 0/4
- Betonstein 30/30 mit Normfuge 0/4
- Betonstein 21/17 Zement gebundene Fuge
- Betonstein 21/17 Kunstharz gebundene Fuge
- TerraWay – kunstharzgebundener Edelsplittbelag
- Bituminöse Tragschicht zweilagig (gemäß RVS 8S.05.14)

Ein wichtiges Kriterium für die Wahl der Untersuchungsvarianten waren Versickerungseigenschaften unterschiedlicher Fugenmaterialien bei gleichem und unterschiedlichen Fugenflächenanteilen. Es wurden sowohl sickerfähige als auch „dichte“ Bauweisen gewählt. Außerdem wurden Farben und Rauigkeiten der Betonpflastersteine berücksichtigen.

### Methodik

Die Versuchsflächen wurden mit einer Größe von 15m<sup>2</sup> als Großlysimeter errichtet. Für die Untersuchungen des Abflussverhaltens und der Schadstoffelimination wurde eine Ausleitung des Oberflächen- und Sickerwasser vorgesehen. Der quantitative Abfluss wurde mittels Messtechnik erfasst. Die Schadstoffelimination wurde mit Hilfe von vor Ort installierten Probebehältnissen im Labor analysiert. Die mikroklimatischen

Eigenschaften, wie oberflächennahe Lufttemperatur und Luftfeuchte sowie Albedo, wurden sensorisch erfasst.

Anhand der Messergebnisse wurden Simulationen ausgewählter Stadttypologien unter zukünftigen Klimabedingungen durchgeführt.

## **Resultate**

### **Abflussverhalten**

Wie erwartet variieren die Ergebnisse der unterschiedlichen Versuchsvarianten stark. Sie reichen von vollkommener Versickerung bis zu nahezu dichter Bauweise.

### **Schadstoffe**

Alle Betonpflasterungen konnten eine ausreichende Reinigungsleistung erbringen.

### **Klima**

Die Wirksamkeit der Wegebefestigungen hängt stark mit deren Wasserspeicherfähigkeit in den oberflächennahen Schichten und der Materialfarbe zusammen.

## **Resümee**

Betonpflasterungen erlauben die gezielte Anpassung des Sickerhaltens an die Erfordernisse des urbanen Raums. Dank des breiten Angebots an Formen und Farben bereichern sie den städtischen Raum nicht nur ästhetisch, sondern tragen auch zu einer Verbesserung des lokalen Klimas im Vergleich zu bituminösen Tragschichten bei.

Angesichts der sehr positiven Ergebnisse und der laufenden Diskussion um Anpassungen der Städte an den Klimawandel, sollten versickerungsfähige Oberflächenbefestigungen aus Betonsteinen verstärkt und gezielt zum Einsatz kommen!



### *Albedo unterschiedlicher Pflasterungen aus Betonsteinen*

Die Albedo bezeichnet, wie groß der Anteil der reflektierten Sonnenstrahlung an der gesamten eintreffenden Sonnenstrahlung ist. Sie ist abhängig von den Eigenschaften der Oberfläche und kann Werte zwischen 0 und 100% Reflexion annehmen.

Desto mehr Strahlung reflektiert wird, also desto höher die Albedo, desto weniger Energie steht zur Verfügung um die Oberfläche zu erwärmen. Dies resultiert in kühleren Oberflächen. Gleichzeitig kann eine verstärkte Reflexion bei starker Sonneneinstrahlung auch eine höhere Belastung durch kurzwellige Strahlung für Fussgänger bedeuten. In jedem Fall wirkt sich die Albedo der städtischen Oberflächen sowohl auf das Mikroklima eines Freiraums sowie auf das Stadtklima aus.

Im Projekt GrünStadtKlima, gefördert durch den FFG, wurden 7 unterschiedliche Pflasterungen aus Betonsteinen über mehr als zwei Jahre auf ihre physikalischen Eigenschaften untersucht (siehe Abbildung 1). Neben Abflussverhalten, Bodenfeuchte, Wärmefluss und Lufttemperatur wurde auch die Albedo auf den einzelnen Versuchsflächen untersucht.

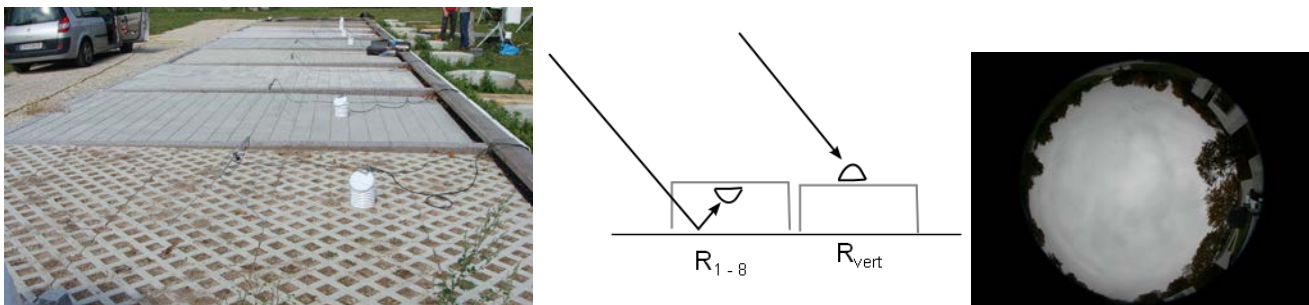


Abbildung 1 links: Versuchsanlage, mitte: Messschema, rechts: Horizonteinschränkung der Klimastation

Dazu wurde die reflektierte Strahlung über jedem einzelnen Versuchstyp gemessen und die eintreffende Strahlung an einer repräsentativen Stelle in gleicher Höhe wie die Messungen für die reflektierte Strahlung. Aufgrund der Horizonteneigung wurden nur Albedowerte herangezogen, in denen sich die Sonne überhalb der beschattenden Elemente steht. Bei den horizontalen Flächen konnte im Hochsommer im idealsten Fall ein Zeitraum von 6 – 18h herangezogen werden.

Da die Flächen nur je 3m breit waren musste ausgeschlossen werden, dass die Messungen von den angrenzenden Flächen beeinflusst werden. Aus diesem Zweck wurden die Sensoren sehr nahe der Oberfläche montiert (ca. 30cm) und auch ihr Sichtwinkel durch nicht reflektierende Blenden eingengt. Die Messanordnung wurde jeweils mit weissen Platten, für die im Labor eine Albedo von 100% nachgewiesen werden konnte, geeicht.

Die Sensoren, die die eintreffende Strahlung messen wurden vor Ort mit einem hochqualitativen und geeichten Messgerät verglichen und somit konnten etwaige Fehler eliminiert werden.

Exemplarisch wurden das Mittel und die Standardabweichung der Albedo für unbedeckte Tage für einen Zeitraum maximaler Einstrahlung und ohne störende Einflüsse untersucht.

Besonders bei inhomogenen Flächen, wie Rasengittersteinen kommen starke Schwankungen im Jahresverlauf vor, wenn Pflanzen absterben, entnommen oder eingesetzt werden. Durch das sehr begrenzte Sichtfeld nahe der Oberfläche haben die Existenz, Größe und Vitalität einzelner Pflanzen oder Unebenheiten starken Einfluss auf die gemessene Albedo, ebenso wie Reflexionen und Schatten der Messanordnung selbst. Diese Aspekte konnten noch nicht vollständig isoliert werden. Die bisher ermittelten Werte sind daher nicht repräsentativ für das gesamte Jahr.

Neben der Rauigkeit beeinflusst besonders die Feuchte der Oberfläche die Albedo sehr stark.

Aber auch mittel und langfristige Abnutzung und Alterung spielen eine wesentliche Rolle, konnten jedoch in diesem Projekt nicht näher untersucht werden.

## Echtzeitmonitoring der Betondruckfestigkeitsentwicklung zur Qualitätssicherung und Optimierung des Bauprozesses

Vergleich der Methoden zum Nachweis der Bauteilfestigkeit

### EINLEITUNG

Im Zuge der Erstellung von Betonbauten bzw. Bauteilen gibt es einige wichtige prozessrelevante Entscheidungen, wie Zeitpunkt des Ausschalens, Zeitpunkt des Vorspannens sowie Festlegung der Dauer der Nachbehandlung. Diese Entscheidungen haben eine wesentliche Auswirkung auf den Baufortschritt und auf die Qualität bzw. Lebensdauer des Bauwerks. Im Wesentlichen sind alle diese Entscheidungen von der frühen Festigkeitsentwicklung des Betons im Bauteil abhängig.

Zu Festlegung dieser prozessrelevanten Entscheidungen können folgende Grundlagen herangezogen werden:

- Erfahrungswerte der Bauausführenden
- Richtwerte aus diversen Normen und Richtlinien
- Festigkeitsprüfungen an aus dem Bauteil entnommen Probekörpern (Bohrkerne)
- Prüfung von Versuchskörpern bei Bauteillagerung
- Zerstörungsfreier Prüfung der Festigkeit am Bauteil

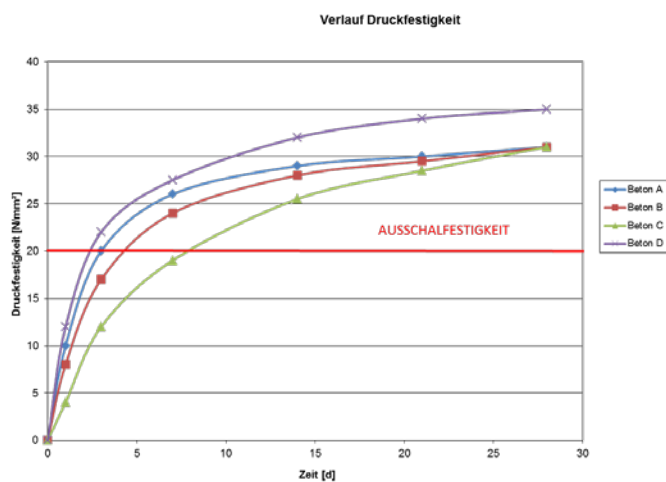


Abbildung 1: Unterschiedliche Festigkeitsentwicklung bei gleicher Druckfestigkeits-Klasse

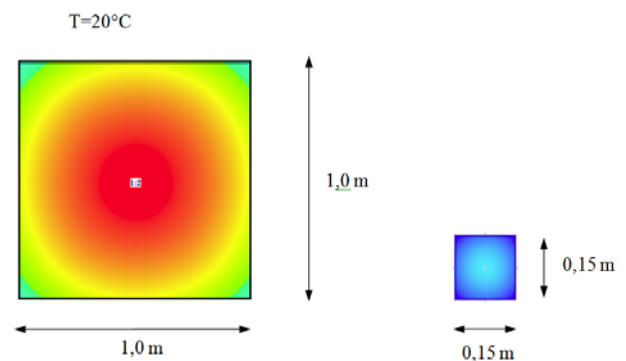


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Temperaturverlaufs im Bauteil und in einem Probekörper

Jeder Bauleiter bzw. Polier trifft fast täglich Entscheidungen hinsichtlich Ausschalzeitpunkt und Dauer der Nachbehandlung. Dabei muss er einen raschen Baufortschritt, sowie die Qualitätsansprüche des Bauwerks gewährleisten. Auch aus den Erfahrungen der Baupraxis zeigt sich das Bild, dass die Entscheidungsträger am Bau die Festigkeit des Betons abschätzen müssen und daher nicht oder nur bedingt die Möglichkeit haben ihre Entscheidungen auf Basis von validen Messwerten zu treffen. Aus diesem Grund wurde die Idee entwickelt, eine baustellengerechte Methode zum Nachweis und Abschätzung der Festigkeit im Bauteil auf ihre Genauigkeit, Funktionalität (Praxistauglichkeit) und Einsatzmöglichkeit zu untersuchen.

### METHODEN ZUM NACHWEIS DER FESTIGKEIT

#### Reifegradverfahren – rechnerische Methode auf Basis der Temperaturentwicklung:

Es gibt im Wesentlichen drei gängige Methoden zur rechnerischen Festigkeitsbestimmung des Betons anhand der Reifegradverfahren nach

- Reife nach Saul
- Reife nach Bresson
- Reife nach de Vree bzw. gewichtete Reife

Bei der Hydratation von Zement entsteht grundsätzlich Wärme. Zwischen der Hydratationswärme und der Festigkeitsentwicklung des Betons existiert in der Regel ein direkter Zusammenhang. Die wichtigsten Einflussfaktoren auf die Hydratationsgeschwindigkeit sind die Umgebungstemperatur und die Art und Menge des verwendeten Bindemittels sowie die Bauteilabmessungen. Theoretische Modelle zur Bestimmung der Betonreife gehen davon aus,

dass gleiche Betonreife auch gleiche Festigkeit im Beton bewirkt und berücksichtigen als wesentlichen Einflussparameter primär die Temperatur. Dieser Ansatz ist jedoch sehr vereinfacht und berücksichtigt den Einfluss unterschiedlicher Bindemittelarten in den jeweiligen Rezepturen nicht. Aufgrund dieser Schwachstelle erfolgte eine Weiterentwicklung dieser ursprünglich sehr einfachen Modelle. Nach de Vree wird neben der mittleren Erhärtungstemperatur auch ein zementspezifischer Kennwert berücksichtigt.

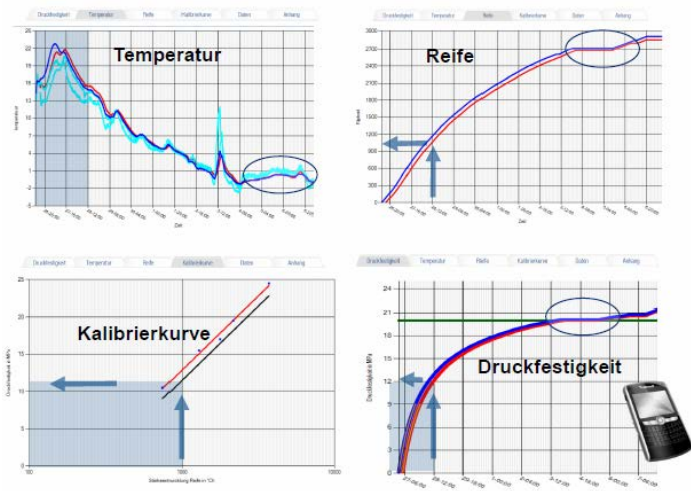


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Festigkeitsermittlung nach der gewichteten Reife nach de Vree

Um das Verhältnis von Festigkeit zu Reife feststellen zu können, muss der verwendete Beton kalibriert werden. Das Verfahren nach de Vree wird seit einigen Jahren in Ländern wie den Niederlanden und Deutschland angewandt.

Diese Methoden werden in Österreich i. d. R. derzeit nicht eingesetzt und es existieren auch keine Grundlagen für die hier eingesetzten Bindemittel.

### Rückprallhammer und Pendelhammer

Die Prüfung mit Rückprall- oder Pendelhammer stellt eine zerstörungsfreie Prüfmethode dar und erlaubt grundsätzlich nur eine Charakterisierung der Gleichmäßigkeit des Betons. Für eine Abschätzung ist eine betonspezifische Kalibrierung an einem Probekörper erforderlich.

### Lagerung von Prüfwürfeln am Bauteil

Bei dieser häufig verwendeten Methode werden Prüfwürfel zugleich mit dem Bauteil hergestellt und auch dort gelagert. Diese Prüfwürfel werden entweder wärmedämmend oder auch einfach ohne Dämmung der Umgebungstemperatur ausgesetzt. Das Risiko dieser Lagerung ist, dass die Temperaturentwicklung im Bauteil und im Würfel sehr unterschiedlich ist und in weiterer Folge auch unterschiedliche Festigkeiten ermittelt werden.

### Entnahme von Bohrkernen und deren Druckfestigkeitsprüfung

Dies eine sehr genaue Methode zur Ermittlung der tatsächlichen Bauwerksfestigkeit, jedoch oft nicht erwünscht, da dem Bauteil Bohrkern entnommen werden müssen, u. U. Bewehrungslagen durchbohrt werden und der Arbeitsaufwand vergleichsweise hoch ist.

### Verwendung von Richtwerten aus Normen, Richtlinien bzw. weiteren technischen Unterlagen

Dies ist vom Aufwand ein sehr einfacher und abgesicherter Weg die Entscheidungen zu treffen. Einerseits enthalten diese Regelwerke meist in Abhängigkeit von der Beton- bzw. Umgebungstemperatur abhängige Tagesangaben zu den Nachbehandlungs- und Ausschalzeiten. Zum Beispiel enthält auch die ÖNORM B 4710-1 einen Richtwert, dass bei Erreichen der 80% der Endfestigkeit ausgeschalt werden darf. Um jedoch mit diesen Angaben zu arbeiten, ist es wiederum notwendig die Festigkeit am Bauteil nachzuweisen.

## PROJEKTABWICKLUNG UND TECHNISCHE LÖSUNGSVORSCHLÄGE

### Laborversuche

Die Behandlung der wesentlichen Fragestellung zur Herstellung von Zusammenhängen zwischen Temperaturverlauf in den Probekörpern und Festigkeitsentwicklung erfolgt in einem ersten Schritt im Rahmen von Laboruntersuchungen. Hierbei werden Probekörper bei unterschiedlichen Bedingungen (Normlagerung bzw. Lagerung bei unterschiedlichen Temperaturen) gelagert und deren Temperaturverlauf sowie die Festigkeitsentwicklung prüftechnisch erfasst.

### Feldversuche an Großkörpern

Auf Basis dieser Laboruntersuchungen sollen grundlegende Zusammenhänge zwischen Festigkeitsentwicklung und Hydratationstemperatur aufgezeigt werden. Darüber hinaus soll untersucht werden, wie erforderliche, zementspezifische Kennwerte zur Bestimmung der Betonreife einfach, aber auch reproduzierbar ermittelt werden können bzw. inwieweit Modelle zur Berechnung der gewichteten Reife von Beton mit der Realität übereinstimmen.

### Baustellenversuche

Abschließende Baustellenversuche sollen dazu dienen, die Forschungsergebnisse auch einer praktischen Umsetzung zuzuführen und ebenso diese Umsetzbarkeit zu beurteilen. Im Zuge dieser Versuche kann man den Einfluss der Bauteilgeometrie und Masse auf die Festigkeitsentwicklung feststellen.



# Monitoring basierte, nichtlineare, probabilistische Analyse der Querkrafttragfähigkeit von Spannbetonfertigteilen

**Bernhard Krug**

*Leitung Forschung & Entwicklung  
Franz Oberndorfer GmbH & Co KG*

*Lambacher Straße 14, A-4623 Gunskirchen, Österreich*

Die bekannten Berechnungsansätze zum Biegetragverhalten von Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen lassen sich sehr gut auf Betonfertigteile mit Vorspannung im sofortigen Verbund (Spannbetonfertigteile) übertragen. Zur Beschreibung des Tragverhaltens unter Querkraftbeanspruchung, gerade für Bauteile ohne bzw. geringer Querkraftbewehrung, existieren sehr unterschiedliche Modelle. Selbst in neueren Forschungsarbeiten lassen sich gegensätzliche Ansätze finden (GÖRTZ 2004, HEGGER und GÖRTZ 2006, REINECK 2001, HEGGER et al. 1999). Ein Großteil der Forschungsarbeiten beschäftigt sich dabei vorwiegend mit Stahlbetonbauteilen bzw. Spannbetonbauteilen mit Vorspannung ohne bzw. nachträglichem Verbund. Diese Ansätze für die Querkrafttragfähigkeit lassen sich nur bedingt auf Spannbetonbauteile mit Vorspannung im sofortigen Verbund (Spannbetonfertigteile) übertragen. Gerade bei Spannbetonfertigteilen treten Produktions-, Transport- und Bauzustände auf, die sich wesentlich auf die Material- und Verbundeigenschaften und somit auf die Tragsicherheit und die Gebrauchstauglichkeit auswirken. In der Regel wird in der ingenieurüblichen Bemessung nur die Schnittgrößenkombination Querkraft und/oder Torsion (V+T) betrachtet, auch wenn üblicherweise die Kombinationen Moment und/oder Normalkraft (M+N) und V+T oder Teile von ihnen gemeinsam auftreten. Durch die näherungsweise Berücksichtigung der Interaktion durch

- die Übernahme des inneren Hebelarms  $z$  von der Biegebemessung in die Querkraftbemessung,
- die Beachtung des Versatzmaßes bei der Konstruktion der Bewehrung und
- die Berücksichtigung von Betonlängsspannungen bei der Wahl der Druckstrebenneigung,

gelingt dennoch eine zuverlässige, wenn auch nicht immer wirtschaftliche, Bemessung von Stahlbeton- und Spannbetonträgern im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS). Vor allem bei Spannbetonfertigteilen treten, bedingt durch die exzentrische Vorspannung, zwangsläufig immer V+N, V+M und V+N+M Kombinationen auf. Zudem ist gerade bei Spannbetonfertigteilen oftmals die genaue Beschreibung des Gebrauchszustandes sinnvoll und die Nachweise im Grenzzustand des Gebrauchszustandes (SLS) maßgebend. Eine Berücksichtigung der Kombination V+N, V+M und V+N+M ist mit den gegenwärtigen Ansätzen und Modellen in den Grenzzuständen nur bedingt möglich.

Für eine exakte Beschreibung des Tragverhaltens von Spannbetonfertigteilen unter Querkraftbeanspruchung sollen in diesem Forschungsprojekt optimierte Monitoring-Systeme bereits bei der Herstellung des Spannbetonfertigteils eingesetzt werden. Das Monitoring wird in diesem Projekt für die systematische Erfassung, Beobachtung und Überwachung der mechanischen Effekte während der Produktion, des anfänglichen Abbindens und des Vorspannens optimiert. Es werden komplexe Prozesse wie die Übertragung der Vorspannung und der damit verbundenen Spannungsverteilung, zeitabhängiges Verhalten des Betons aufgrund der frühen Belastung, Auswirkung der Überlagerung der Spannungsfelder aus Normalkraft (Vorspannung) und Querkraft (Eigengewicht) etc. vor allem im Bereich der Lasteinleitung erfasst. Die Konzeption der Monitoring-Systeme erfolgt auch unter dem Aspekt der Möglichkeit der Zuverlässigkeits- und Lebensdauerbewertung durch das zugänglich machen der Strukturperformance. Es ermöglicht Einflüsse auf das Fertigteil und Auswirkungen auf Bauteileigenschaften bereits bei der Herstellung, Lagerung, Transport und Manipulation zu erheben, zu analysieren und in Bezug auf normspezifische Grenzzustände zu definieren. Begleitend zu Bauteilversuchen wird im zunehmenden Maße für vertiefende Analysen auf numerische Simulationsmodelle (z.B. FEM) zurückgegriffen. Nichtlineare numerische Modelle erlauben das monitorte wahre Verhalten der Messobjekte bzw. Bauteile abzubilden und u.a. vertiefte Parameterstudien und Simulationen durchzuführen (ZILCH et al. 2009). Auf Basis der Messdaten aus dem optimierten Monitoring ist es u.a. das Ziel, die numerischen Simulationsmodelle zu verifizieren und zu validieren. Des Weiteren wird in diesem Forschungsprojekt durch eine definierte Parametrierung ausgewählter Systemannahmen und durch eine Verknüpfung der Modell-Parameter mit den Messdaten aus dem Monitoring eine Modellkalibrierung der Querkrafttragfähigkeit von Spannbetonfertigteilen im frühesten und normalfesten Zustand mittels

Optimierungsverfahren angestrebt (CHELLINI et. al. 2010). Neben den nichtlinearen numerischen Parameterstudien zur realitätsnahen Abbildung der Querkrafttragfähigkeit unter Querkraft-Normalkraft-Momenten Interaktion bei Spannbetonfertigteilen werden probabilistische Simulationstechniken zur Erfassung der epistemischen und aleatorischen Unsicherheiten in den Material- Geometrie und sonstigen Eigenschaften eingesetzt. Unter anderem erfolgt die Bewertung auf Grundlage probabilistischer Zuverlässigkeitskonzepte und auf Basis von Sensitivitäts- und Korrelationsstudien. Für diese Studien werden u.a. zur Inkludierung von Monitoring-Informationen Modellkorrekturverfahren nach EN 1990 Anhang D herangezogen. Der in EN 1990 Anhang D verankerte Modellkorrekturfaktoransatz erlaubt die statistische Quantifizierung der Modellabweichung über einen Mittelwertkorrekturfaktor und den Variationskoeffizienten des Modellfehlers (STRAUSS et al. 2011).

Unabhängig des Berechnungs- bzw. Simulationsmodells stellen die Materialeigenschaften der Werkstoffe Beton, Betonstahl und Spannstahl sowie des Verbundwerkstoffes Spannbeton die wesentliche Grundlage für die genaue Beschreibung des Tragverhaltens unter Querkraftbeanspruchung dar. Die Materialeigenschaften der einzelnen Werkstoffe wurden ausreichend erforscht. Es liegen auch mehrere Forschungsergebnisse hinsichtlich des Spannbetons - vor allem bei Vorspannung ohne bzw. nachträglichem Verbund - vor. Aufgrund der unterschiedlichen Herstellungsverfahren in Fertigteilwerken wie z.B. Gleitfertigungsverfahren, Extruderverfahren, Beton selbstverdichtend bzw. Schalungsrüttler, werden spezielle Anforderungen vor allem an den Frischbeton gestellt. Überlagert mit der sehr frühen (meist < 24h), sehr hohen Belastung aufgrund der Spannbettvorspannung, besteht Forschungsbedarf bezüglich des zeitabhängigen Verhaltens des Betons (Kriechen, Schwinden, Relaxation), der Verbundspannungen (Einfluss Hoyer Effekt), des Tension-Stiffening bzw. Tension-Softening, der Dübelwirkung und der Rissreibung. So gibt es auch hierzu mehrere Forschungsarbeiten, wobei dabei meist nur einzelnen Eigenschaften untersucht wurden, nicht aber das Zusammenwirken bzw. die gegenseitige Beeinflussung. Deshalb werden weiterführende Untersuchungen sowie umfangreiche Versuche mit Klein- und Großkörpern zur Verdichtung des Informationsgehalts durchgeführt.

## Danksagung

Für die Ermöglichung dieses Forschungsprojektes gebührt der Österreichischen Forschungsgesellschaft FFG und der Universität für Bodenkultur Wien ein herzlicher Dank.

## Literatur

- CHELLINI, G., De ROECK, G., NARDINI, L., SALVATORE, W. (2010): *“Damage analysis of a steel-concrete composite frame by finite element model updating”*, Journal of Constructional Steel Research, Elsevier, S. 348–411.
- GÖRTZ, S. (2004): *„Zum Schubrißverhalten von Stahlbeton- und Spannbetonbalken aus Normal- und Hochleistungsbeton“*, Dissertation RWTH Aachen.
- HEGGER, J., und GÖRTZ, S. (2006): *„Querkraftmodell für Bauteile aus Normalbeton und Hochleistungsbeton“*, Beton- und Stahlbetonbau 101, S. 695-705.
- HEGGER, J., KÖNIG, G., ZILCH, K., REINECK, K.-H., GÖRTZ, S., BEUTEL, R., SCHENCK, G., KLIVER, J., DEHN, F. und STALLER, M. (1999): *„Überprüfung und Vereinheitlichung der Bemessungsansätze für querkraftbeanspruchte Stahlbeton- und Spannbetonbauteile aus normalfestem und hochfestem Beton nach DIN 1045-1“*, Abschlussbericht für das DIBT-Forschungsvorhaben IV 1-5-876/98.
- REINECK, K.-H. (2001): *„Hintergründe zur Querkraftbemessung in DIN 1045-1 für Bauteile aus Konstruktionsbeton mit Querkraftbewehrung“*, Bauingenieur Band 76, S. 168-179.
- STRAUSS, A, WENDNER, R., BERGMEISTER, K. REITERER, M., HORVATITS, J.: (2011): *„Modellkorrekturfaktoren als „Performance Indikatoren“ für die Langzeitbewertung der integralen Marktwasserbrücke S33.24“*, Beton- und Stahlbetonbau 106, S. 231-240.
- ZILCH, K., WEIHER, H., GLÄSER, Ch. (2009): *„Monitoring im Betonbau“*. Betonkalender 2009, Ernst & Sohn, Berlin, S. 135 – 185.

## Optimierung der Frästechnik zur Ausbildung eines bestmöglichen Verbundes

DI Dr. Martin Peyerl / Mag.(FH) DI Dr. Stefan Krispel  
Smart Minerals GmbH

*Bmst. Ing. Günter Vogl / Michael Seebacher  
H. Junger Baugesellschaft m.b.H*

Im Rahmen der Tätigkeit der Firma H. Junger Baugesellschaft m.b.H. werden Tragwerke bzw. Bauwerke aller Art statisch und konstruktiv instandgesetzt und verstärkt. Hierbei wird in der Regel der Altbeton entfernt bzw. abgetragen und die ursprüngliche Form durch Auftragen einer neuen Betonschicht wieder hergestellt. Bisher wurde bei diesen Arbeiten der Verbund zwischen Untergrund und Neubeton oft nur ungenügend berücksichtigt.

Ziel des von der FFG geforderten Projektes war es, baupraktische Aussagen über Zusammenhänge zwischen Oberflächenbeschaffenheit und Verbundeigenschaften tätigen zu können. Als erster Schritt wurden von der Firma Junger unterschiedliche Verfahren und Methoden zur Herstellung adäquater Oberflächen entwickelt, um großflächig, durch Fräsung bzw. Hochdruckwasserstrahlen die erforderlichen Untergrundqualitäten zu erzielen.

Im Rahmen der Abwicklung des Projektes erfolgte die Herstellung einer Versuchsfläche mit den Gesamtabmessungen von 10 x 15 m mit zwei unterschiedlichen Verstärkungssystemen Brückenbau sowie Tunnelbau. Nach der Einbringen der unteren Betonschicht wurden auf jeder der Versuchsflächen unterschiedliche Oberflächenbearbeitungsmaßnahmen wie Fräsung mit unterschiedlichen Fräsabständen von 5 mm bis 16 mm, teilweise nur längs bzw. längs und quer mit teilweisen Hochdruckwasserstrahlen in unterschiedlichen Intensitäten ausgeführt. Abbildung 1 zeigt die Herstellung der unterschiedlich texturierten Oberflächen sowie die Erfassung der Oberflächencharakteristika mit Hilfe eines digitalen Oberflächenmodells (DOM).

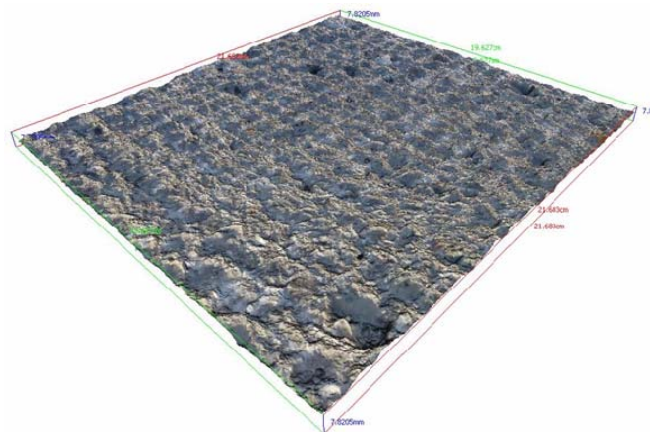


Abbildung 1: Herstellung der Oberflächen sowie digitales Oberflächenmodell einer längs und quer gefrästen Oberfläche

Wesentliche Aussagen für das Forschungsvorhaben wurden durch die Gegenüberstellung der Verbund- mit den Oberflächeneigenschaften gefunden. Es erfolgte die Zusammenstellung der Kennwerte zur Oberflächencharakterisierung (Rautiefe [1] und Parametern des Oberflächenmodells [2]) in Relation zu den Verbundeigenschaften (Haftzugfestigkeit [3] sowie Kerb-Spaltzugfestigkeit und spezifischer Bruchenergie [4]).

Die Ergebnisse zeigten klar, dass die alleinige Bestimmung der Rautiefe nur ungenügende Aussagen über die späteren Verbundeigenschaften liefert. Wesentlich besser eignen sich hierfür ausgewählte Parameter aus dem DOM. Abbildung 2 macht beispielsweise deutlich, dass gute Zusammenhänge zwischen dem Parameter Sdr (Verhältnis wahrer zu projizierter Fläche) und den Verbundeigenschaften bestehen. Diese Korrelation mit der spezifischen Bruchenergie ist grundsätzlich linear darstellbar.

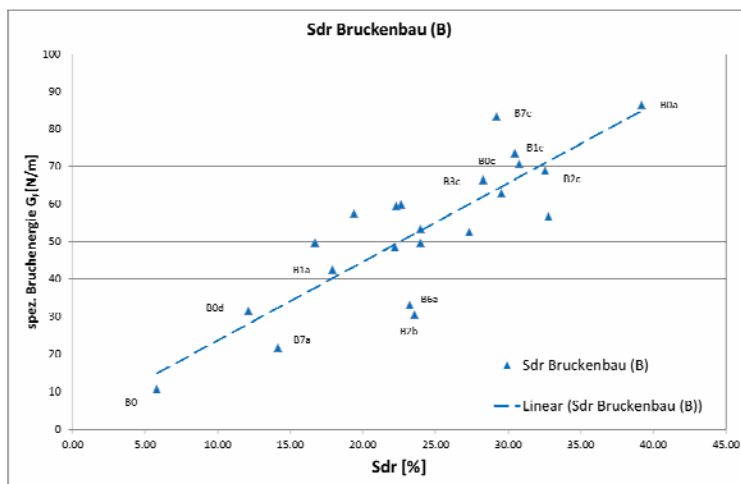


Abbildung 2: Zusammenhänge zwischen Sdr und  $G_F$  bei System Brückenbau

Durch die gewonnenen Informationen konnten Anforderungen an die Oberflächenbeschaffenheit auf Basis der Informationen aus dem digitalen Oberflächenmodell definiert werden. Die in diesem Projekt erzielten Erkenntnisse lieferten zudem wertvolle Informationen zum zielgerichteten Einsatz von Maschinen und Bauabläufen und sichern eine bessere Qualität und Dauerhaftigkeit von Beton-Verbundkonstruktionen.

#### Literatur:

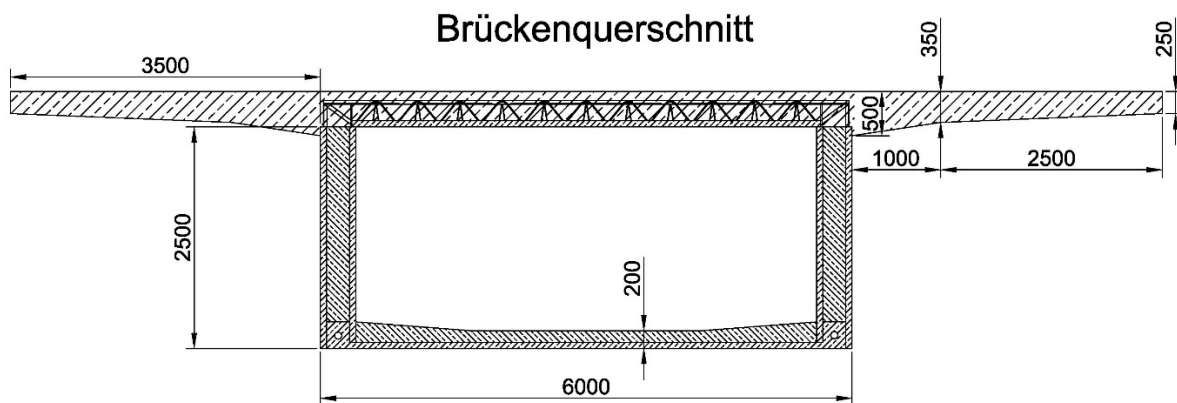
- [1] Kaufmann, N.: Das Sandflächenverfahren, Straßenbautechnik, Heft 3 1971
- [2] Peyerl, M.: Bruchmechanische und stereoskopische Charakterisierung von Interfaces zementgebundener Werkstoffe, Dissertation an der TU Wien, 2012
- [3] ONR 23303: Prüfverfahren Beton (PvB) – Nationale Anwendung der Prüfnormen für Beton und seiner Ausgangsstoffe, ASI 2010
- [4] ÖNORM B 3592: Bestimmung der Kerb-Spaltzugfestigkeit und der spezifischen Bruchenergie von Baustoffen, Baustoffverbindungen und Verbundbaustoffen, ASI 2011

## Kombination von Doppelwänden und Schalungssystemen zur Herstellung von Brückenquerschnitten

Sara Foremniak und Johann Kollegger

Technische Universität Wien  
Institut für Tragkonstruktionen – Betonbau

Im Hoch- und Industriebau werden seit Jahren erfolgreich Gitterträgerdecken und Doppelwandelemente eingesetzt. Diese Halbfertigteilelemente mit einer Stärke von 5-7 cm dienen als Schalung für den anschließend auf- bzw. eingebrachten Ortbeton. Die Vorteile, die sich aus dieser Baumethode ergeben, sollen zukünftig auch im Brücken- und Ingenieurbau genutzt werden. Hierzu wird ein neuer Brückenquerschnitt (Siehe Abbildung 1.) mit einer Fahrbahnbreite von derzeit 13m am Institut für Tragkonstruktionen- Betonbau der Technischen Universität Wien in Zusammenarbeit mit der Firma Oberndorfer und der Firma Doka erarbeitet. Das Ziel ist die Entwicklung einer Baumethode unter Verwendung von Stahlbeton - Fertigteilträgern mit einer geschalteten Ortbetonergänzung.



**Abbildung 1.** Brückenquerschnitt

Die Idee besteht darin, die Seiten des Kastenquerschnittes aus Doppelwandelementen herzustellen und diese dann durch die Bodenplatte und eine Gitterträgerdecke mit Stahlelementen zu verbinden. Durch das Verfüllen der Doppelwandelemente mit Beton entsteht eine kraftschlüssige Verbindung der einzelnen Elemente. Das geringe Gewicht des nun fertiggestellten Trägers erlaubt einen einfachen Transport und Einbau auf der Baustelle mit herkömmlichen Geräten. Nach der Montage des Trägers kann das Schalungssystem für die Kragarme angebracht werden. Dieses dient für alle weiteren Arbeitsschritte als Absturzsicherung.

In einem Forschungsvorhaben an der TU Wien wurden zwei unterschiedlich bewehrte Brückenquerschnitte mit einer Länge von jeweils 2 m hergestellt. Diese wurden anschließend mit Spanngliedern zusammengeführt und verbunden. Die beschränkte Dicke der Doppelwandelemente führte zu Fragestellungen im Hinblick auf das Stabilitätsverhalten und die Fugenausbildung, die im Forschungsprojekt mit numerischen Simulationen und der Herstellung und Durchführung von Versuchen an den zwei Brückenquerschnitten untersucht wurden.

Mit den Ergebnissen des Forschungsprojektes konnte gezeigt werden, dass die Herstellung von Fertigteilbrückenquerschnitten unter Verwendung von Fertigteilplatten und Doppelwandelemente technisch möglich ist und gegenüber Stahlträgern erhebliche Kostenvorteile aufweist. Der hohe Vorfertigungsgrad des Brückenquerschnitts erweist sich aufgrund der einfachen Einzelteile mit einem hohen Automatisierungsgrad als sehr wirtschaftlich. Zusätzlich entfällt auf der Baustelle der Aufwand für Traggerüste. Im Vergleich zur Segmentbauweise weisen diese Brückenquerschnitte im Bauzustand vor dem Einbringen des Füllbetons ein geringeres Gewicht auf, wodurch sich Einsatzmöglichkeiten für die Betonbauweise erschließen, die bisher dem Stahlbau vorbehalten waren.



# Ersteinsatz von UHPCFRC bei der Ertüchtigung und Adaptierung von Autobahn- und Schnellstraßenbrücken in Österreich

Autor

Dipl.-Ing. Dipl.-Ing. Erwin Pilch

Fachbereich Technik – Innovation – Umwelt, Team Bautechnik, Experte Brückenbau

ASFINAG Bau Management GMBH

Fuchsenfeldweg 71, A-8074 GRAZ-RAABA

TEL +43 (0) 50108- 14966, FAX +43 (0) 50108-14552, MOBIL +43 (0) 664 60108-14966

[erwin.pilch@asfinag.at](mailto:erwin.pilch@asfinag.at)



Zusammenfassung

Optimierter Instandsetzungs- und Ertüchtigungsprozess besteht aus folgenden Phasen:

- Voruntersuchung (+ chemische Analysen, + stat. Nachrechnungen, + Aufzeigen von Lösungsansätzen (Varianten inkl. Kostenschätzung)

- Internes Fachkomitee bestehend aus jeweils einem Brückenexperten Erhaltung, Betrieb und Bau lobt optimierte Baumaßnahme aus.

- Planung und Ausführung auf Basis der erhobenen Unterlagen und der nationalen, internationalen und internen Richtlinien (interne Begleitung der Baumaßnahme und Festlegung der zu verwendenden Normen (Diskrepanz der Richtlinien zum Zeitpunkt der Errichtung und aktuellen gültigen Normen)

Durch das Forcieren des Umbaus von bestehenden konventionell gelagerten Brücken in lager- und fugenlose und somit erhaltungsarme Bauwerke entstehen neue Aufgabenfelder in der Forschung und Entwicklung von Baustoffen für eine optimale Umsetzung der Ideen.

Problemstellungen und Lösungsvorschläge anhand von bereits ausgeführten Beispielen werden adaptiert durch den Erfahrungsgewinn und –austausch sowohl intern als auch extern.

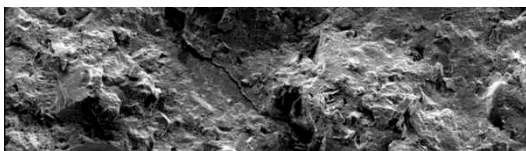


Abb. 2 UHPC unter einem Elektronenmikroskop

Das Manko der fehlenden Regelwerke für Bauwerksadaptierungen und Ultrahochleistungsbeton wird teilweise durch verstärkte unternehmensübergreifenden Verkehrsinfrastrukturforschung als Grundlagenforschung für

zukünftige Handlungsanweisungen und Richtlinien und mittels Vorversuche und Pilotprojekte versucht auszugleichen. Übersicht, Highlights, Ergebnisse und Erkenntnisse aus dem Pilotprojekt – Ertüchtigung der Steinbachbrücke im Bereich der S6 Semmering Schnellstraße mit UHPCFRC (Ultra High Performance Carbon Fibre Reinforced Concrete  $f_{ck}$

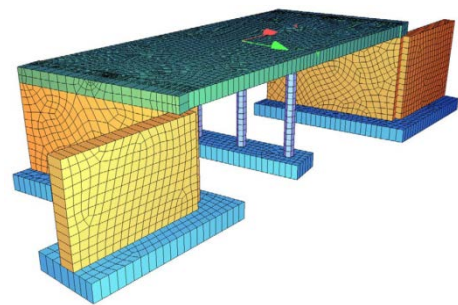


Abb. 1 FEM-Modell Steinbachbrücke ohne Ertüchtigung



Abb. 3 Vorversuche im Baulabor der TU Graz

150N/mm<sup>2</sup>) und auch die Schwierigkeiten bei der Umsetzung werden erläutert. Angefangen von den Vorversuchen und der Parametern für ein geeignetes Instandsetzungsobjekt, über Probemischungen, Oberflächenbearbeitungsversuchen, Griffigkeitsuntersuchungen und Mischversuchen bei geeigneten Lieferbetonwerken und die universitäre Begleitung des Entwurfes und der Ausschreibungsplanung bis hin zur Ausführung und Erstellung einer Handlungsanweisung („best practice“) spannt sich die Projektvorstellung. Detailfotos, Skizzen und Videos von der Ausführungsphase des Pilotprojektes: Ertüchtigung und Umbau der Steinbachbrücke in ein Integrales Tragwerk mittels direkt befahrbaren, ultrahochfesten, kohlefaserbewehrten Aufbeton ohne Abdichtung sollen einen Einblick in die neuen innovativen Möglichkeiten der Brückenertüchtigungen geben.



**Abb. 4 Misch- und Verarbeitungsversuch ausserhalb des Labors bei der Fa. Cemex in Krieglach**

Graz am 2.9.2013

Erwin Pilch

Quellen: Abb. 1 Wörle Sparowitz Ing. ZT- GmbH, Abb. 2 Universität Kassel

# Anwendung von UHPC in der Abwassertechnik

Roman, L., Macht, J.  
Kirchdorfer Gruppe

*In den letzten beiden Jahren hat sich ein F&E-Projekt der Kirchdorfer Fertigteile Holding (KFTH) der UHPC Materialentwicklung gewidmet. Als erste Produktanwendung wurde der Einsatz von UHPC für Schlitzrinnen geprüft. Die Ergebnisse der entsprechenden Machbarkeitsstudie werden im Folgenden präsentiert.*

## 1. Einleitung

Entwässerungsrinnen für Verkehrsflächen dürfen gemäß ÖNORM EN 1433 unter anderem aus den Werkstoffen Beton (bewehrt und unbewehrt), Faserbeton und Kunstharzbeton (zumeist als Polymerbeton bezeichnet) hergestellt werden. Für diese Werkstoffe werden im Prinzip nur Anforderungen an die Festigkeit gestellt – Druckfestigkeit an Normalbeton, Druck- und Biegezugfestigkeit an Polymer- und Faserbeton. Für Normalbeton wird auch bei entsprechender Exposition die Frost-Tausalz-Beständigkeit gefordert. Für den Österreichischen Markt ist entsprechend den Anforderungen der Asfinag für Straßentunnel die Betonsorte C35/45/B7/FaB ausreichend. Je nach Belastungsklasse werden von der Kirchdorfer Gruppe Entwässerungsrinnen unbewehrt oder bewehrt produziert.

Um allerdings auch bei Ausschreibungen, die ausdrücklich Kunstharzbeton mit zusätzlichen Anforderungen, beispielhaft:

- Biegezugfestigkeit > 20 N/mm<sup>2</sup>
- Druckfestigkeit > 100 N/mm<sup>2</sup>
- E-Modul 20-25 kN/mm<sup>2</sup>
- Frostausalz-Beständigkeit: hoch
- Chemikalienbeständigkeit: Benzine, Öle, Säuren, Basen (pH: 4-13)

Alternativen anbieten zu können, wurde UHPC [1] als Werkstoffvariante genauer betrachtet.

Aber auch gegenüber Normalbeton ergeben sich interessante Aspekte beim Einsatz von UHPC. Auf Grund der hohen Festigkeiten können die Wandstärken wesentlich verringert werden. Somit wird das Produkt leichter und weist vor allem bei gleichem Platzbedarf eine größere hydraulische Leistungsfähigkeit auf.

## 2. Materialparameter

Nach einigen Mischungsentwürfen mit unterschiedlichen Komponenten wurde schließlich für UHPC „notwendige“ Druckfestigkeit >150 N/mm<sup>2</sup> [1] erreicht. Bei Verwendung von Basalt als Gesteinskörnung wurden z.B. noch höherer Festigkeiten erzielt. Allerdings gilt Basalt als nicht säurebeständig (z.B. [2]) und wurde daher für die geplante Anwendung nicht weiter verfolgt.

## 2.1 Festigkeiten

Die erzielten Festigkeiten werden in den Tabellen 1 und 2 vergleichend wiedergegeben. Hierbei wurden 2 Lagerungsarten verglichen:

- warm: nach kurzer Vorlagerung erfolgt eine mehrtägige Lagerung in der Wärmekammer bei Temperaturen knapp unter 100°, danach langsames Abkühlen und anschließend Luftlagerung bis zum Prüfzeitpunkt
- kalt: ohne Wärmebehandlung, Lagerung gemäß ONR 23303

Dadurch sollte abgeklärt werden, ob zusätzliche Investitionskosten für eine Wärmekammer im produzierenden Werk notwendig sind. Zudem wurden die Mischungen auch mit und ohne Fasern hergestellt, da die Fasern einen wesentlichen Anteil an den Materialkosten darstellen.

Tabelle 1: Druckfestigkeiten von Würfeln mit Kantenlänge 10cm

Fasern	Lagerung	Druckfestigkeit im Prüfalter [Tage]	
		4	28
Ohne Fasern	Warm	105%	> 150 MPa / 100%
	Kalt	77%	
Mit Fasern	Warm	115%	110%
	Kalt	79%	

Tabelle 2: Biegezugfestigkeiten analog ÖNORM EN 196-3

Fasern	Lagerung	Biegezugfestigkeit im Prüfalter [Tage]	
		7	28
Ohne Fasern	Warm	88%	100%
	Kalt		88%
Mit Fasern	warm	147% (>20 MPa)	112%
	Kalt		159% (>20MPa)

Für eine zielsichere Überschreitung der „150 N/mm<sup>2</sup> - Grenze“ ist eine mehrtägige Wärmebehandlung notwendig (vergl. auch [1]), der Einfluss der Wärmebehandlung auf die Biegezugfestigkeit scheint eher noch unklar [1]. Der Einsatz von Stahlfasern bewirkt eine Steigerung der Druckfestigkeit von > 10%, die Biegezugfestigkeit überschreitet die 20 MPa-Grenze.

Die maximale Druckfestigkeit wird nach Abschluss der Wärmebehandlung im Alter von 4 Tagen erreicht. Der anschließende Abfall der Druckfestigkeit wurde auch in anderen Untersuchungen beobachtet und wird Schwinden zugeschrieben [3].

## 2.2 Dauerhaftigkeit

Die gleichwertige Beständigkeit für die Frostklasse XF4 wurde gemäß ONR 23303 nachgewiesen. Die Abwitterungen lagen mit 1g/m<sup>2</sup> weit unter üblichen Ergebnissen von Normalbeton, auch ohne Verwendung von künstlichen Luftporen.

Die Prüfung auf lösenden Angriff wurde gemäß ÖNORM B 4710-1, Anhang K ermittelt. Zu der normativ geforderten Lagerung bei einem pH-Wert ≤ 4 wurde auch die Prüfung mit einem pH-Wert ≤ 2,5 durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Der entwickelte UHPC erfüllt somit die Anforderungen an XA3L.

Tabelle 3: Ergebnisse der Prüfung auf lösenden Angriff

	Prüf- medium	Vergleichs- beton	UHPC
Masseverlust [% der Ausgangsmasse]	pH ≤ 4	70,3	4,4
	pH ≤ 2,5	69,6	49,6
Querschnittsverlust („Tragfähigkeit“) [% des Ausgangsquerschnitts]	pH ≤ 4	67,6	21,4
	pH ≤ 2,5	65,8	48,7

Im Vergleich zu Normalbeton weist der entwickelte UHPC eine wesentlich größere Beständigkeit gegen lösenden Angriff auf. Abbildung 1 zeigt die Probekörper aus UHPC bzw. Vergleichsbeton nach Abschluss der Bestimmung der „Resttragfähigkeit“ bei Lagerung in Säure mit  $\text{pH} \leq 4$ , Abbildung 2 mit  $\text{pH} \leq 2,5$ .

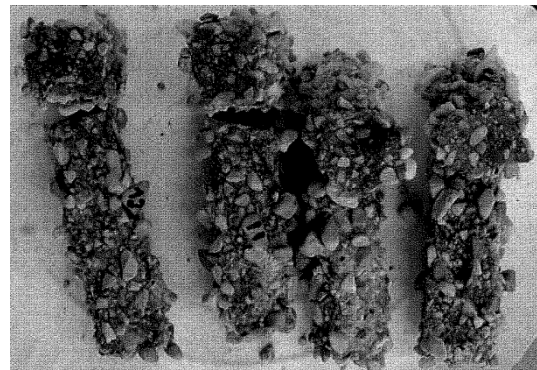
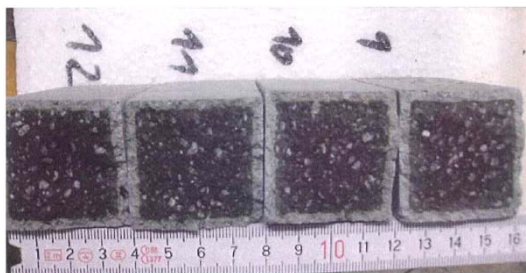


Abbildung 1: Probekörper nach Bestimmung der Resttragfähigkeit gemäß ÖNORM B 4710-1, Anhang K ( $\text{pH} \leq 4,0$ ); links: UHPC, rechts: Vergleichsbeton (Fotos: bpv)

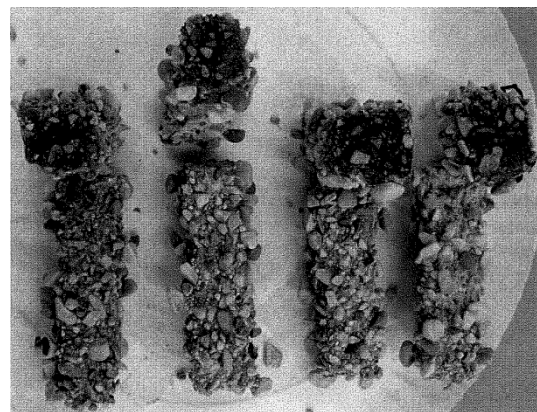


Abbildung 1: Probekörper nach Bestimmung der Resttragfähigkeit in Anlehnung an ÖNORM B 4710-1, Anhang K ( $\text{pH} \leq 2,5$ ); links: UHPC, rechts: Vergleichsbeton (Fotos: bpv)

### 3. Produkt Schlitzrinne

Nach dem positiven Abschluss der Materialprüfungen wurden entsprechende Prototypen für die Prüfung von Entwässerungssystemen gemäß EN 1433 erzeugt. Die hohen Kosten der Fasern, siehe Tabelle 4, führten zu der Überlegung, die Schlitzrinnen nicht mit durchgehendem Schlitz zu konstruieren, sondern entsprechend den statischen Erfordernissen Stege einzuplanen, wodurch die geringere Biegezugfestigkeit ohne Stahlfasern ausreichend wäre. Eine Nachfrage bei



den Betreibern der Tunnel, die ihre Reinigungssysteme auf durchgehende Schlitze ausgelegt haben, ergab, dass bei entsprechendem Kostenvorteil auch eine Umstellung des Reinigungssystems angedacht werden kann (vergl. Reinigungssystem Asfinag).

Sowohl eine Bordschlitzrinne, siehe Abbildung 3, als auch ein Betonrinnenkörper wurden der Prüfung gemäß ÖNORM EN 1433 unterzogen.



Abbildung 3: Bordschlitzrinne aus UHPC bei der Prüfung gemäß ÖNORM EN 1433 (Foto: BTI)



Abbildung 4: Betonrinne aus UHPC bei der Prüfung gemäß ÖNORM EN 1433 (Foto: BTI)



Beide getesteten Probekörper erreichten die Klasse C250, Typ M nach ÖNORM EN 1433.

Tabelle 4: Kostenvergleich (bezogen auf Materialkosten UHPC ohne Fasern)

Werkstoff	Materialkosten
UHPC ohne Fasern.	100%
UHPC mit Fasern	Ca. 175%
Kunstharzbeton ( z.B. [4])	> 400%

#### **4. Zusammenfassung**

UHPC ist auf Grund seiner hervorragenden Eigenschaften bestens für Entwässerungssysteme in Bereichen, wo besonders hohe Anforderungen hinsichtlich Dauerhaftigkeit gestellt werden, geeignet - er erfüllt die Anforderungen XF4 und XA3L. Im Vergleich zu konkurrierenden Werkstoffen, v.a. Kunstharzbeton, kann ein großer Kostenvorteil entstehen, v.a. wenn auf Faserbewehrung verzichtet werden kann. Aber auch in weniger sensiblen Anwendungsfällen kann die größere hydraulische Leistungsfähigkeit gegenüber Normalbeton ein entscheidender Vorteil sein.

Die Machbarkeitsstudie der F&E der KFTH für das Produkt Schlitzrinne aus UHPC ist somit positiv abgeschlossen. Als nächster Schritt wird die Systementwicklung in Angriff genommen – Dichtungen und Düker müssen hierfür entwickelt werden. Aber auch über andere Anwendungen von UHPC wird laufend nachgedacht.

#### **Literatur**

[1] Fehling, E., Schmidt, M., Teichmann, T., Bunje, K., Bornemann, R., Middendorf, B.: Entwicklung, Dauerhaftigkeit und Berechnung Ultrahochfester Betone (UHPC) Forschungsbericht. Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau Heft 1, Kassel University Press, 2003. ISBN: 978-3-89958-108-9

[2] Ramachandran, B.E., Velpar, V., Balasubramanian, N.: Chemical durability studies on basalt fibres. Journal of Material Science, Vol. 16, 1981

[3] Sido, E.Y.: Effects of Early Age Thermal Curing on the Strength Properties of Ultra High Performance Concrete. Master thesis, Ghent University, 2012

[4] Baumeister, E.: Hohlkugelkomposit – Charakterisierung thermischer und mechanischer Eigenschaften eines neuen Leichtbauwerkstoffes. Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2004

Kurzbeitrag von DI Charlotte Schönweger, TU Wien, Institut für Tragkonstruktionen-  
Betonbau zum Kolloquium am 06. November 2013

„Forschung & Entwicklung für Zement und Beton“

Mit dem Titel:

### **Türme für Windkraftanlagen aus Doppelwandelementen**

Am Institut für Tragkonstruktionen der TU Wien wird derzeit an der Entwicklung einer neuen Bauweise für Türme von Windkraftanlagen gearbeitet.

Bei der genannten neuen Bauweise handelt es sich um ein Verfahren zur Herstellung von Stahlbetontürmen für Windkraftanlagen aus Doppelwandelementen. Der Querschnitt der Turmwand besteht aus polygonal angeordneten Doppelwandelementen, dessen Umfang sich vom Fundament zur Spitze hin verjüngt.

Die Doppelwandelemente für einen Turmabschnitt werden als Fertigteile angeliefert und auf einem Vormontageplatz zu einem Pyramidenstumpf so zusammengesetzt, dass jeder horizontale Querschnitt durch den Pyramidenstumpf die Form eines regelmäßigen Vielecks aufweist. Die Doppelwandelemente müssen anschließend kraftschlüssig miteinander verbunden werden, so dass ein tragfähiges Flächentragwerk entsteht. Die vertikalen Fugen an den Stoßstellen zweier benachbarter Doppelwandelemente an der Außenwand und an der Innenwand müssen mit Füllbeton, Vergussmörtel, Silikon oder einem Abdichtband geschlossen werden. Die Doppelwandelemente selbst sind dabei so ausgerichtet, dass die Unterkanten der Außenplatten sowie die der Innenplatten jeweils in einer horizontalen Ebene liegen.

Der unterste Pyramidenstumpf kann direkt auf dem Fundament aufgebaut werden. Im Inneren des Pyramidenstumpfs wird eine Arbeitsbühne mit Kletterschalung angebracht, von welcher aus eine Vorbereitung und Bearbeitung der horizontalen Fugen zwischen zwei Pyramidenstümpfen und eine genaue Platzierung der folgenden Pyramidenstümpfe möglich ist. Die Arbeitsbühne klettert jeweils in so eine Höhe, dass die bereits platzierten Pyramidenstümpfe selbst eine Arbeitssicherung bilden.

Ist der unterste Pyramidenstumpf mitsamt der Arbeitsbühne montiert, so kann der nächste Pyramidenstumpf auf den ersten gehoben werden. Es ist dabei auf eine exakte Positionierung der Stümpfe zu achten. Die horizontale Ausrichtung kann über Abstandhalter in der horizontalen Fuge zwischen den Pyramidenstümpfen gesteuert werden. Die exakte

horizontale Ausrichtung muss über drei Messpunkte, die in einer Ebene liegen ausjustiert werden.

Sind die Pyramidenstümpfe in Position gebracht, so können diese mit Pumpbeton verfüllt werden. Das Heben und das Verfüllen der bereits fertig montierten Stümpfe sollen dabei in solch einer Arbeitsgeschwindigkeit erfolgen, dass es sich um einen kontinuierlichen Prozess handelt. Dadurch soll ein Füllbeton ohne Fugen entstehen.

Die Montage eines Ringes aus Doppelwandelementen auf dem vorhergehenden Bauabschnitt kann auf Distanzhaltern mit 20-50 mm erfolgen, so dass die Fuge, welche an der Außenseite der Außen- und Innenwand mit Schalelementen verschlossen ist, gleichzeitig mit dem Verfüllen der Doppelwandelemente mit Beton verfüllt wird.

Der Prozess des Hebens der vormontierten Ringe und das anschließende Verfüllen, wird so lange fortgesetzt, bis die gewünschte Höhe des Turmbauwerks erreicht ist.

Die Doppelwandelemente im Montagezustand können eine Höhe von bis zu 13 m haben, was, was auch die Höhe eines Pyramidenstumpfs definiert.

Es ist zu erwarten, dass beschriebene Herstellungsverfahren eine schnellere und wirtschaftlichere Bauweise im Vergleich zu herkömmlichen Stahlbetonturmweisen ermöglicht.

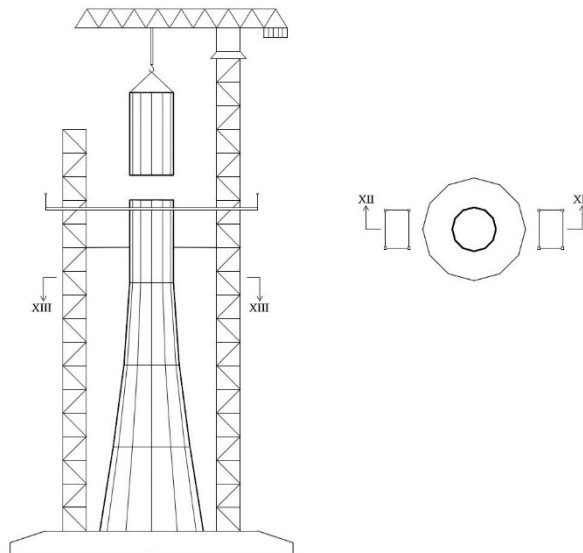


Abbildung 1: Skizze Turmbauwerk