

Wolfgang Mörth, Anton Mayer

Zuschlagsoptimierte Betone für Tunnelinnenschalen mit hohem Brandwiderstand

Dr. Wolfgang Mörth

Porr Technobau und Umwelttechnik
Zweigniederlassung Steiermark

Univ.-Prof. DI Dr. Anton Mayer

Montanuniversität Leoben

1 Einleitung

Durch mehrere katastrophale Brandereignisse in Tunnelbauten in den letzten Jahrzehnten, mit zahlreichen Todesopfern und zum Teil folgenschweren Schädigungen der Tunnelauskleidungen, wurde die Forderung nach Betonbaustoffen mit erhöhtem Brandwiderstand für den Tunnelbau immer größer.

Zur Entwicklung von Tunnelinnenschalenbetonen, die diesen Forderungen entsprechen, wurden in den letzten Jahren intensive Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten durchgeführt u. a. [1; 8].

2 Aufgabenstellung

Hauptursachen für das Versagen von Tunnelinnenschalen im Brandfall sind ungünstige, nicht brandbeständige Zuschlagstoffe, Festigkeitsverlust der Bindematrix und insbesondere das Fehlen einer ausreichenden Zahl von Kapillarporen, um den entstehenden Wasserdampf rechtzeitig abzuleiten.

Die bei Temperaturen über 100 °C spontan einsetzenden hohen Dampfdrücke führen bei ungeeigneten Betonqualitäten zu explosionsartigen Abplatzungen und bei weiterer Überhitzung zum raschen Festigkeitsverlust des Bewehrungsstahls.

Zur Verringerung von Abplatzungen hat sich ausgehend von Erfahrungen in anderen Werkstoffbereichen sowie aus gezielten Betonforschungsvorhaben die Beigabe von Polymerfasern zum Frischbeton, beispielsweise von PP-Fasern, als sehr wirksame Unterstützung erwiesen.

Um eine thermische Schädigung an der vorhandenen Bewehrung hintanzuhalten, wird

Abb. 1: Anschlag eines typischen serpentinierten Dunits; Olivinreste in Serpentinmatrix. Ol-Olivin; Sp-Serpentin; Vergrößerung: 100 fach

Foto: © Prof. Mayer

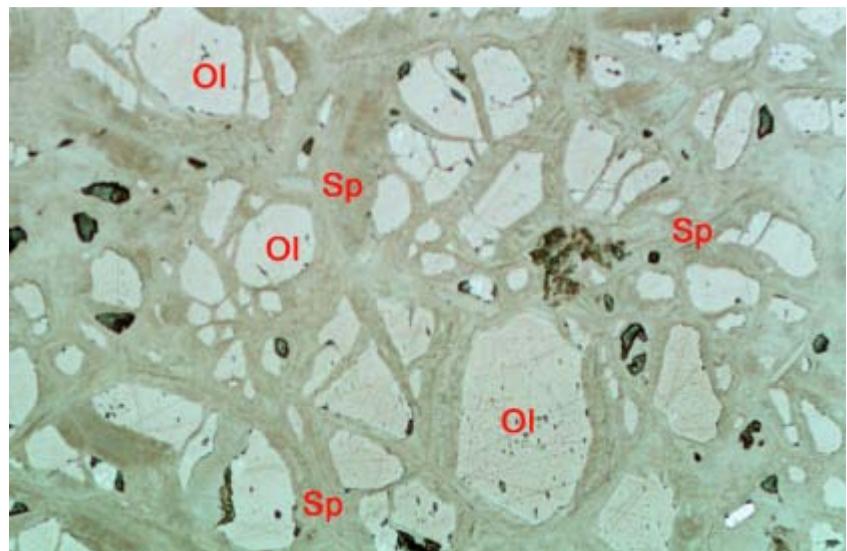
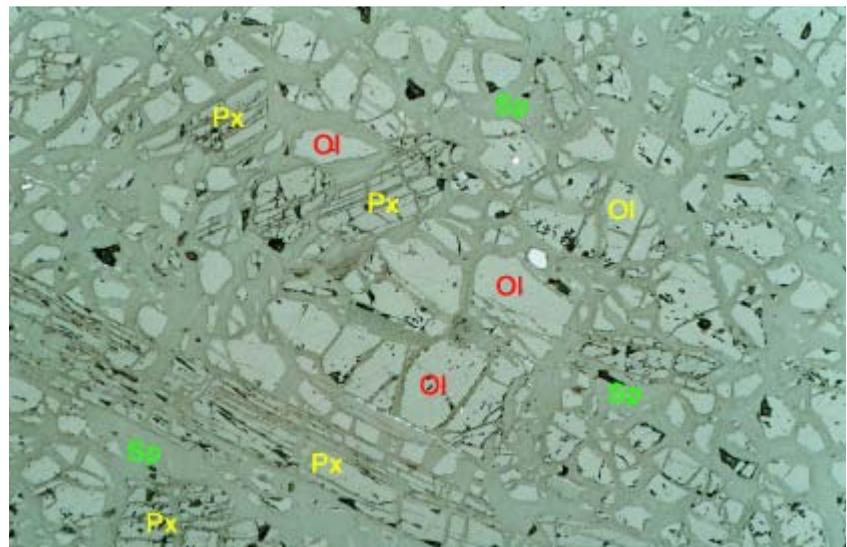


Abb. 2: Anschlag eines typischen serpentinierten Harzburgites; Olivin und Pyroxenreste in Serpentinmatrix. Ol-Olivin; Px-Pyroxen; Sp-Serpentin; Vergrößerung: 50 fach

Foto: © Prof. Mayer



seitens der Materialeigenschaften zwingend die Forderung gestellt, dass der heute übliche Bewehrungsstahl maximal einer Temperatur von 300 °C ausgesetzt werden darf.

Aus dem Studium von Schadensfällen, der Fachliteratur und von Patentschriften ist bekannt, dass bislang die meisten wissenschaftlichen Untersuchungen, Forschungsarbeiten usw. allerdings kaum tieferen Bezug auf Stoffparameter und Eigenschaftsmerkmale wie Wärmeleitfähigkeit, thermische Dehnung, Schmelzbereiche, Gasabspaltung, thermischen Zerfall etc. der als Zuschlag verwendeten Gesteinskörnungen nehmen.

Das ist erstaunlich, da doch die meisten Betonqualitäten zu rund 80–85 % aus mineralischen Zuschlagstoffen bzw. Gesteinskörnungen bestehen und die Zuschlagstoffe mit Sicherheit einen sehr wesentlichen Einfluss auf die jeweiligen Betonwerkstoffe und deren Brandbeständigkeit ausüben.

3 Rohstoffsituation und thermische Beständigkeit der Rohstoffe

Unter besonderer Berücksichtigung der in Österreich sehr zahlreichen Straßen- und Eisenbahntunnelanlagen einerseits und der gegebenen Rohstoffsituation andererseits wurde im Jahre 2002 durch die Fa. Schwarzl ein umfangreiches Forschungs- und Entwicklungsprogramm mit dem Schwerpunkt „Brandbeständige Baustoffe für den Tunnelbau“ gestartet.

Die bislang üblicherweise als Betonzuschlag verwendeten Gesteine lassen sich grob in folgende Gruppen einteilen:

– Gesteine mit Quarzvormacht

Lockergesteine: Kiese, wie sie in den großen Schottervorkommen des Quartärs bzw. Tertiärs in Österreich vorliegen

Festgesteine: gebrochene Granite, Gneise etc.

– Gesteine mit Karbonatvormacht

Lockergesteine: quartäre Schotter bzw. Schuttfächer v. a. im Einflussbereich der Kalkalpen

Festgesteine: gebrochene Kalke und Dolomite

– Natürlich vorkommende Gemenge aus den beiden oben genannten Gruppen

– Untergeordnet werden gebrochene Zuschläge aus Basalt bzw. Diabas und Amphibolit verwendet.

Die thermische Beständigkeit dieser Zuschläge ist durch die folgenden Parameter gekennzeichnet:

– Relativ niedere Schmelz- oder Zerfallstemperaturen von 1.000 bis 1.200 °C

– Zerfall und Festigkeitsverlust z. B. der Karbonate bei ca. 800–1.000 °C. Dabei kommt es ab ca. 800 °C zur Abspaltung von CO₂-Gas, welches z. B. mit heißen Brandgasen und Ruß zu giftigem und hochexplosivem CO-Gas reagieren kann.

– Das aus Kalkstein- oder Dolomit freigesetzte Kalziumoxid „Brandkalk = Ätzkalk“ bildet unter Feuchtigkeitszutritt hoch basisches, ätzendes Ca(OH)₂, welches sowohl für die Löschmannschaften als auch für die Umwelt eine zusätzliche Gefahrenquelle darstellt.

– Bei Verwendung von an sich feuerfesten Quarzzuschlägen treten bei 573 °C spontane und reversible Modifikationsänderungen von Tiefquarz (Beta-Quarz) in Hochquarz (Alpha-Quarz) und damit verbundene sprunghafte und gefügerstörende Volumsänderungen auf. Der Übergang von Alpha-Quarz zu Cristobalit oder Tridymit ist mit Volumsänderungen von 15–16 % verbunden.

Als Alternative zu den bisher genannten Zuschlägen haben sich Gesteine mit einem hohen Magnesium-Eisen-Hydrosilikatanteil aus der Lagerstätte Preg der Fa. Schwarzl – in weiterer Folge als „Preger Zuschlag“ bezeichnet – in der Steiermark als besonders vorteilhaft erwiesen. Die Lagerstätte liegt innerhalb des als „Kraubather Ultramafitstock“ bekannten Massivs.

Es handelt sich bei diesen Gesteinen um Abkömmlinge aus dem Bereich des oberen Erdmantels, die in vereinfachter Nomenklatur als zumeist stark serpentinierte Peridotite (Dunite und Harzburgite/Lherzolite) sowie untergeordnet als Orthopyroxenite (Bronzi-

tite bzw. Bronzitfelse) anzusprechen sind (Abb. 1 und 2).

Diese ultrabasischen Tiefengesteine unterscheiden sich wesentlich von den meisten, handelsüblich verwendeten Zuschlaggesteinen vor allem in Hinblick auf die thermische Beständigkeit.

Im Einzelnen sind zu nennen:

– hohe Schmelzbereiche bis über 1.700 °C

– keine sprunghaften Modifikations- und Volumsänderungen, da diese Gesteine keinen freien Quarz und bis auf Kluftfüllungen auch keine freien Karbonate führen

– eine hohe Wärmespeicherfähigkeit und eine vergleichsweise geringe Wärmeleitfähigkeit

– Im Brandfall wird aus dem Kristallgitter bestimmter Minerale Hydratwasser unter hohem Wärmeverbrauch abgegeben.

– Des Weiteren bilden sich durch die Abgabe von Hydratwasser Mikroporenräume, welche eine zusätzliche thermische Isolationswirkung bedingen.

– Durch den Zusatz ausgewählter Magnesiumsilikate können im Brandfall bereits an der Betonoberfläche große Mengen an schädlichen, aggressiven Brandgasbestandteilen, wie Chlorwasserstoff und Schwefeldioxid, zu entsprechenden Magnesiumchloriden oder Magnesiumsulfaten chemisch gebunden und am weiteren Eindringen in den Beton gehindert werden.

4 Brandversuche

Zum Einsatz kamen bei allen Brandversuchen ausschließlich gebrochene Gesteinskörnungen aus „Preger Zuschlägen“.

4.1 Kleinbrandversuche

Um die im Kapitel 3 beschriebenen Erkenntnisse aus Laborversuchen in die Praxis umzusetzen, wurden vorerst im Technikummaßstab zahlreiche Brandversuche nach zwei unterschiedlichen Systemen durchgeführt.

BETON ZEMENT



Abb. 3: Deckel des ARP-Versuchsofens unmittelbar nach Beendigung eines Kleinbrandversuches mit vier zylindrischen Prüfkörpern. Durchmesser der Prüfkörper = 150 mm Foto: © ARP

– Versuchsbrände ARP (Abb. 3)

In diesen Versuchsserien wurden Prüfkörper von unterschiedlicher Form in einem eigens von ARP-Donawitz konstruierten Versuchsofen nach der RWS-Kurve (Rijkswaterstaat-Kurve) bis zu einer Maximaltemperatur von 1.380 °C über 120 Minuten belastet.

– Versuchsbrände TU-Wien (Abb. 4)

Diese Versuche wurden am Institut für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz (Prof. Schneider) durchgeführt, wobei plattenförmige Prüfkörper gem. EBM-Kurve einer Brandtemperatur von 1.200 °C über 180 Minuten ausgesetzt wurden.

Dazu war die Herstellung folgender Bauelemente nötig:

- Schalplatz zur Herstellung der Schalung und zum Betonieren der Fertigteilwände und Kalotten – mehrfach verwendbar
- Bodenplatte und Ortbetonwand aus PP-Faserbeton für den Brandplatz – mehrfach verwendbar
- Fertigteilwände aus PP-Faserbeton für den Brandplatz – mehrfach verwendbar
- zwei bewehrte Kalotten für die Brandtests – nach Sanierung evtl. mehrfach verwendbar

Das Versuchskonzept sah vor, extern betonierte Kalottenelemente mittels Autokran auf den stationären Brandplatz einzuheben. Nach dem Einheben und Einhausen des Kalottenelementes erfolgte das Aufbringen eines Ausgleichsbetons am Scheitel der jeweiligen Kalotte als Fundament für die Ballastierung.

Anschließend wurde das Kalottenelement mit Kies 4/8 mm bis zur Oberkante der Seitenwände eingeschüttet. Als letzter Schritt wurde die Kalotte mit 60 t Kranballastgewicht belastet (Abb. 6).

Der Versuch gliederte sich in zwei Hauptabschnitte, innerhalb derer jeweils eine Tunnelkalotte getestet wurde.

Die Unterschiede zwischen den beiden Kalotten bezogen sich auf folgende Punkte:

- unterschiedliche Betonüberdeckung der Bewehrung (6 bzw. 10 cm)
- unterschiedliche Sieblinien der Zuschläge, um die Pumpfähigkeit des Betons zu testen
- unterschiedliche Materialzusammensetzung der Zuschläge

4.2.1 Betoneigenschaften

Beide Kalotten wurden gem. der Richtlinie für Innenschalenbeton (ÖVBB) aus Pumpbeton hergestellt [9].

Die wichtigsten Betonkennwerte sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

4.2 Großbrandversuche

Nach den erfolgreichen Kleinbrandversuchen wurde beschlossen, Großbrandversuche in Anlehnung an jene auf Baulos LT 22 durchzuführen [8].

Dabei sollten zwei Tunnelkalotten gem. EBM-Kurve über 180 Minuten einer Maximaltemperatur von 1.200 °C ausgesetzt werden.

Für die Durchführung der Großbrandversuche wurde am Betriebsgelände der Fa. Schwarzl in Unterpremstätten ein permanenter Brandplatz mit mehrfach verwendbaren Teilen eingerichtet (Abb. 5 und 6).

Abb. 4: Der Brandversuchsstand der TU-Wien mit drei Testkörpern (A, B, C). Abmessungen der Testkörper L x B x H = 60 x 50 x 30 cm Foto: © Wolfgang Mörth



Dem Beton wurden 2 kg/m^3 PP-Fasern beigegeben. Die Überprüfung der Faserverteilung nach zwei unterschiedlichen Verfahren zeigte eine gute und homogene Verteilung der Fasern im Beton [4; 5].

Zusätzlich erfolgte für Kalotte 1, wegen der erhöhten Wasserbeigabe (185 l), der Nachweis eines gleichwertigen bzw. reduzierten Schwindens gem. ÖNORM B 3303. Die Anforderungen für Beton RRS nach ÖNORM B 3303 wurden erfüllt [4].

Am Festbeton wurden vom VÖZ FI [4] folgende Parameter für beide Kalotten vor und nach dem Brand untersucht:

- Rohdichte
- Druckfestigkeit
- E-Modul
- Wassergehalt in verschiedenen Tiefen

Die Ergebnisse sind in den Tabellen 2 und 3 dargestellt.

5 Erkenntnisse und Ausblick

Die durchgeführten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten haben zu zahlreichen neuen Erkenntnissen und qualitativen Neuentwicklungen am Sektor Betonbaustoffe mit erhöhter Brandbeständigkeit sowie zu neuen Wegen in Bezug auf den Personen- und Bauwerksschutz im Falle von Katastrophenbränden geführt.

Tab. 1: Frischbetondaten der beiden Kalottenelemente

	Frischbeton Rohdichte [kg]	W/B-Wert	Luft n. 10 min Mischzeit %	Wassergehalt [kg]
Kalotte 1	2.363	0,49	3	185
Kalotte 2	2.330	0,46	4	175

Tab. 2: Festbetondaten vor dem Brand. Die Wassergehalte wurden bis zu einer Tiefe von 15 cm ab Brandraum berücksichtigt.

	Rohdichte [kg/m ³]	Druckfestigkeit [N/mm ²]	E-Modul [kN/mm ²]	Wassergehalt [%]
Kalotte 1	2.340	54	30	4,4 bis 5,2
Kalotte 2	2.330	58	26	4,9 bis 5,8

Tab. 3: Festbetondaten nach dem Brand. Die Wassergehalte wurden bis zu einer Tiefe von 15 cm ab Brandraum berücksichtigt.

	Rohdichte [kg/m ³]	Druckfestigkeit [N/mm ²]	E-Modul [kN/mm ²]	Wassergehalt [%]
Kalotte 1	2.310	61	26	0,5 bis 1,9
Kalotte 2	2.230	47	23	0,2 bis 1,0

Abb. 5: Brandversuchsstand mit eingehobener Kalotte aus PP-Faserbeton. Am Scheitel der Kalotte Ausgleichsbeton als Fundament für die Ballastierung. Bodenplatte, Rückwand (Ortbeton) und Seitenteile (Fertigteile) aus PP-Faserbeton

Abb. 6: Der fertige Versuchsaufbau unmittelbar vor Beginn des Großbrandversuches
Fotos: © Wolfgang Mörth



BETON ZEMENT

32

5.1 Personenschutz – Umweltschutz

- Besonders hervorzuheben ist, dass diese neuen Betonqualitäten kein CO₂ und kein giftiges CO-Gas freisetzen.
- Im Zuge von Lösch- und Sanierungsarbeiten entstehen keine ätzenden, personen- und umweltgefährdenden Ca(OH)₂-Laugen.
- Giftige Chlor-, Schwefel- und Fluorgase können noch während des Brandes von der später abzutragenden Betonoberfläche im erheblichen Umfang chemisch gebunden und neutralisiert werden.
- Durch die im Temperaturbereich zwischen etwa 100 und 800 °C thermisch induzierte Abspaltung des chemisch-mineralisch gebundenen Wassers stellt sich ein zusätzlicher Kühl- und Brandlöschereffekt ein. In den neu entwickelten Betonqualitäten kann durchschnittlich mit etwa 250 kg mineralisch gebundenem Wasser je Kubikmeter Beton gerechnet werden.

5.2 Bauwerksschutz

- Die Feuerfestigkeit der Magnesium-Silikatzuschläge liegt so hoch, dass selbst bei 1.380 °C als extreme Temperaturobergrenze und bei Brandzeiten von 3 Stunden noch kein Abschmelzen der neu entwickelten Betonbaustoffe auftritt.
- Durch das Fehlen von freiem Quarz und Karbonaten entfallen die in Kap. 2 beschriebenen Modifikationsänderungen und die damit verbundene Totalschädigung des Betons.
- Als Folge der autogenen Kühlung durch den starken endothermen Effekt bei der Abspaltung des mineralisch gebundenen Wassers wird nicht nur der Beton gekühlt, sondern es entwickeln sich im Zuschlagsgestein auch noch zusätzliche Mikroporen, welche eine erhöhte Wärmedämmung und ein langsames Eindringen der Temperaturfront in den Beton bewirken.

Die für den Bewehrungsstahl kritischen 300 °C wurden bei einer Betondeckung von etwa 7 cm erreicht. Bei vergleichbaren Brandversuchen waren bisher immer etwa 10 cm Betonüberdeckung nötig, um die maximal zulässigen 300 °C nicht zu überschreiten (Abb. 7).

Daraus ergibt sich die Konsequenz, dass die Herstellung von Stahlbetonbauteilen mit einer Betondeckung von lediglich 7–8 cm (Planmaß) für den Einsatz auf der Baustelle möglich scheint.

Dadurch sind vor allem bei Tunnelbauwerken mit geringen Überdeckungen bzw. bei in offener Bauweise hergestellten Tunnelabschnitten Einsparungen möglich.

- In keinem der beiden Versuche kam es zu Abplatzererscheinungen am Kalottenbeton - weder im heißen noch im abgekühlten Zustand. Dies deutet auf eine sehr gute Temperaturbeständigkeit des Betons hin (Abb. 8 und 9).

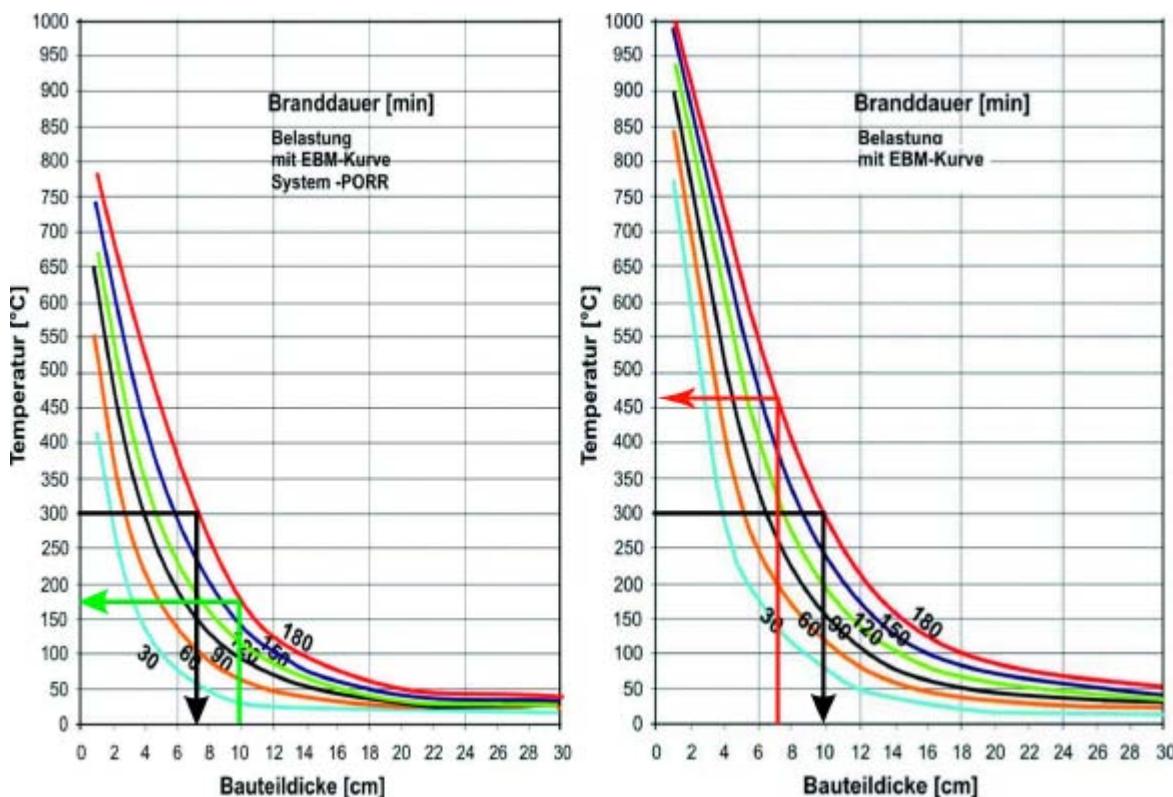


Abb. 7: Vergleich der Temperatureindringung zwischen Großbrandversuchen mit optimierten Zuschlägen gem. System Schwarzl/Porr (links) und einem Standardzuschlag (rechts).

Linkes Bild: Die für die Bewehrung kritische Temperatur von 300 °C wird in etwa 7 cm Tiefe erreicht. Bei einer Bauteildicke von 10 cm liegt die Temperatur des Betons bei ca. 175 °C.

Rechtes Bild: Die für die Bewehrung kritische Temperatur von 300 °C wird in etwa 10 cm Tiefe erreicht. Bei einer Bauteildicke von 7 cm liegt die Temperatur des Betons bei über 450 °C. Grafik: © Dr. Horvath



Abb. 8: Großbrandversuch Schwarzl: die Kalotte etwa 24 Stunden nach dem Brandversuch. Keine Abplatzungen am Beton erkennbar. Foto: © Wolfgang Mörth



Abb. 9: Großbrandversuch LT 22: die Kalotte nach dem Abkühlen mit deutlich erkennbarer Schädigung, hervorgerufen durch das Abfallen der thermisch zerstörten Oberfläche. Foto: © Dr. Horvath

5.3 Vorteile bei der Sanierung

- Durch die geringere Eindringtiefe und das langsamere Eindringen der Temperaturfront wird die Menge des abzutragenden Betons geringer sein. Demzufolge sind bei Sanierungsfällen Kostenreduktionen und Zeiteinsparungen erreichbar.
- Durch Wegfall der beschriebenen Brandkalk- und Laugenproblematik sind bei Sanierungsarbeiten Kostenreduktionen bei der Entsorgung von Abwässern zu erwarten.

6 Danksagung

Das beschriebene Projekt wurde vom Forschungsförderfond der gewerblichen Wirtschaft (FFF) unter der Projektnummer 805068 gefördert. Die Verfasser danken dem FFF für die gute Zusammenarbeit.

Weiters soll an dieser Stelle dem Team des Projekts „Praxisverhalten von erhöht brandbeständigem (Innenschalen-)Beton (EBB)“ für die äußerst hilfreiche Zusammenarbeit gedankt werden.

Die Verfasser danken den Herren DI Christof Haberland (Porr Tunnelbau) und DI Dr. Johannes Horvath (ARGE Bautech) für die Unterstützung und konstruktive Zusammenarbeit.

7 Literatur

- [1] BM f. Verkehr, Innovation u. Technologie & Eisenbahn-Hochleistungs AG: Brandbeständigkeit von Faser-, Stahl-, und Spannbeton. Straßenforschung, Heft 544, Wien, 2004
- [2] Schneider U., Horvath J.: Untersuchung auf Abplatzverhalten und Temperaturverhalten von Tunnelinnenschalenbetonen unter Feuerbeanspruchung. Univ.-Bericht, TU-Wien, Wien, 2003
- [3] Schneider U., Horvath J.: Durchführung eines Brandversuches an einem Tunnelsegment (Kalotte) auf dem Betriebsgelände der Fa. Schwarzl in Unterpremstätten. Univ.-Bericht, TU-Wien, Wien, 2003
- [4] Steigenberger J., Nischer P., Krüsel St.: Bericht B 886/03 - Großbrandversuch von Faserbetonkalotten Fa. Schwarzl. Univ.-Bericht, VÖZFI Wien, Wien, 2003

[5] Perterer Th.: Bestimmung des Fasergehaltes und der Faserverteilung von Frischbetonproben. Univ.-Bericht, ARP Donawitz, Donawitz, 2004

[6] Pollak, Th.: Projektbericht Entwicklung von brandbeständigen Baustoffen für den Tunnelbau. Univ.-Bericht, ARP Donawitz, Donawitz, 2004

[7] Mörth W., Mayer A.: Projektbericht Entwicklung von brandbeständigen Baustoffen für den Tunnelbau. Univ.-Bericht, Fa. Schwarzl, Unterpremstätten, 2004

[8] Steigenberger J., Nischer P., Wiklicky H.: Praxisverhalten von erhöht brandbeständigem (Innenschalen-)Beton (EBB).Univ.-Schlussbericht, FFF-Projekt 806201, Wien, 2003

[9] ÖVBB: Richtlinie „Innenschalenbeton“. Österreichische Vereinigung für Beton und Bautechnik, Wien, 2003