

## Erhalten von Betonstraßen durch Anwendung von ultra-hochfestem Beton (UHPC) zur Erhöhung der Tragfähigkeit und Verbesserung der Gebrauchseigenschaften

FA 89.188

Forschungsstelle: Universität Kassel, Fachgebiet Werkstoffe des Bauwesens und Bauchemie (Prof. Dr.-Ing. M. Schmidt)

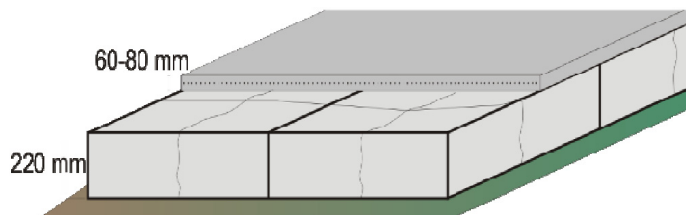
Bearbeiter: Schmidt, M. / Freisinger, S.

Auftraggeber: Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach

Abschluss: März 2009

### 1 Aufgabenstellung

Aufgrund des stetig steigenden Schwerlastverkehrsaufkommens nimmt die Instandsetzung von abgängigen Asphalt- oder Betonfahrbahnen einen immer größeren Stellenwert ein. Bereits seit Jahrzehnten werden in den USA und Kanada, alte abgängige Fahrbahnen kostengünstig mit einer neuen, in der Regel etwa 15 bis 25 cm dicken Betonschicht im sogenannten Whitetopping-Verfahren überbaut. In einem von der Universität Kassel im Auftrag und gemeinsam mit der Bundesanstalt für Straßenwesen bearbeiteten Forschungsprojekt wurde untersucht, ob diese Bauweise noch dauerhafter und dadurch noch wirtschaftlicher und nachhaltiger wird, wenn bewehrter, faserhaltiger Hochleistungsbeton - hochfester Beton (HPC) mit einer Druckfestigkeit von rd. 120 N/mm<sup>2</sup> nach DIN 1045-2 oder besonders gefügedichter ultra-hochfester Beton (UHPC) mit einer Druckfestigkeit um 180 N/mm<sup>2</sup> verwendet wird und die Schichtdicke dadurch auf 6 bis 8 cm reduziert werden kann.



**Bild 1:** Idee von Whitetopping mit hochfestem/ultra-hochfestem Beton

Zum einen kann der Materialaufwand deutlich reduziert werden, zum anderen wird z. B. die lichte Höhe der über der Fahrbahn geführten Brücken kaum beeinträchtigt. Durch die durchgehende Bewehrung ist eine fugenlose Bauweise realisierbar, die den Fahrkomfort ebenfalls verbessert. Für eine ausreichende Griffigkeit und Geräuschkürzung sollte eine Waschbetonoberfläche eingebracht werden.

### 2 Untersuchungsmethodik

Mit einem adaptierten FE-Programm für die Bemessung von Straßenaufbauten wurde zunächst der Straßenaufbau vordimensioniert, wobei die gemeinsame Tragwirkung von Fasern und Stab stahlbewehrung berücksichtigt wurden. Neben der ausreichend tragfähigen Schichtdicke wurde auch der für eine ausreichende Rissweitenbegrenzung auf weniger als 0,1 mm erforderliche Bewehrungsgehalt ermittelt. Anschließend wurde das Tragverhalten im Labor an einem realitätsnahen Modell aufbau mit einer 20 cm dicken, simulierten, abgängigen Betondecke und einer 6 cm dicken UHPC- bzw. einer 8 cm dicken HPC-Deckschicht – beide mit Matten (R589) bewehrt – validiert. Nach 2 Mio. Lastwechseln mit einer simulierten Rad-Einzellast von 60 bzw. 70 kN wurden keine nennenswerten Ermüdungserscheinungen festgestellt.

Im Labor wurden parallel dazu zwei unterschiedliche faserverstärkte Hochleistungsbetone – ein Hochfester und ein ultra-hochfester Beton entwickelt, die mit einem üblichen Betonstraßenfertiger eingebaut und vollständig verdichtet werden können. Wegen der sehr geringen Betonüberdeckung über der Bewehrung sollten beide Betone zudem praktisch undurchlässig für Chloridionen sein und ohne LP-Mittel einen ausreichend hohen Widerstand gegen Frost und Tausalz aufweisen.

Aufbauend auf bekannten Rezepturen [3] wurden je eine Mischung für den hochfesten Beton, bestehend aus Zement, Mikrosilika, Sand 0/2 mm, Wasser, Fließmittel (PCE), Basalt 2/8 mm und Mikrostahlfasern mit einem w/z-Wert von etwa 0,35, und für den ultra-hochfesten Beton, bestehend aus Zement, Mikrosilika, Feinstsand 0/0,5 mm, Quarzmehl, Basalt 2/8 mm, Wasser, Fließmittel (PCE) und Mikrostahlfasern mit einem w/z-Wert von etwa 0,20 so modifiziert, dass sie den Anforderungen an Konsistenz, Verarbeitbarkeit, Festigkeit und Dauerhaftigkeit entsprachen. Folgende Untersuchungen wurden durchgeführt.

Als Frischbetonkennwert wurde das Ausbreitmaß nach DIN 12350 ermittelt. Es sollte für den Einbau mit einem Straßenfertiger etwa 35 cm betragen.

Als Festbetonkennwerte wurde in Anlehnung an DIN EN 12390 sowohl die Druckfestigkeit an Zylindern (Ø 50 mm, h = 300 mm) und Würfeln (h=150 mm), als auch die Biegezugfestigkeit an Balken (l x b x h=700 x 150 x 150 mm) im Alter von jeweils 1, 2, 7, 28 und 56 Tagen bestimmt. Als Dauerhaftigkeitsparameter wurden:

- die Porosität und die Porenradienverteilung,
- der Frost-Tausalz-Widerstand,
- der Chlorideindringwiderstand,
- das Schwindverhalten an Zylindern sowie
- die Carbonatisierung

ermittelt.

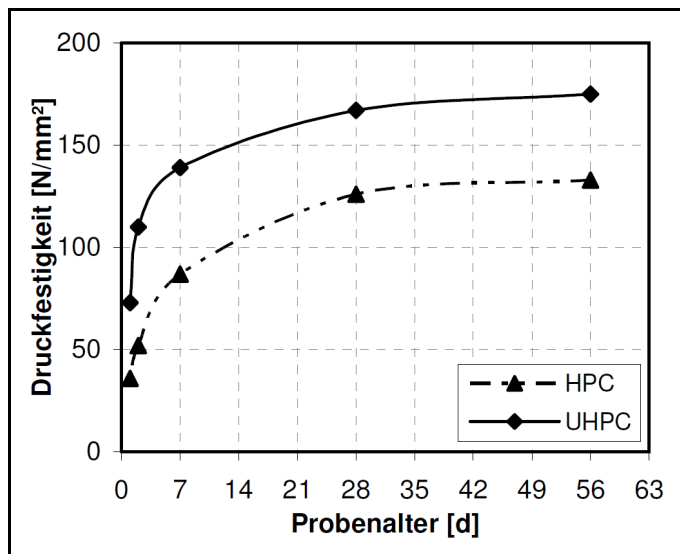
### 3 Untersuchungsergebnisse

Beim hochfesten Beton wurden das angestrebte Ausbreitmaß von 35 cm und die Mindestverarbeitungszeit von 90 Minuten ohne zusätzliche Maßnahmen erreicht. Beim UHPC musste aufgrund des hohen Zementgehalts und des niedrigen Wasser-Bindemittel-Verhältnisses von 0,20 ein Verzögerer eingesetzt werden, um die Verarbeitungszeit zu realisieren. Das geforderte Ausbreitmaß wurde durch Variation des FM-Gehalts eingestellt.

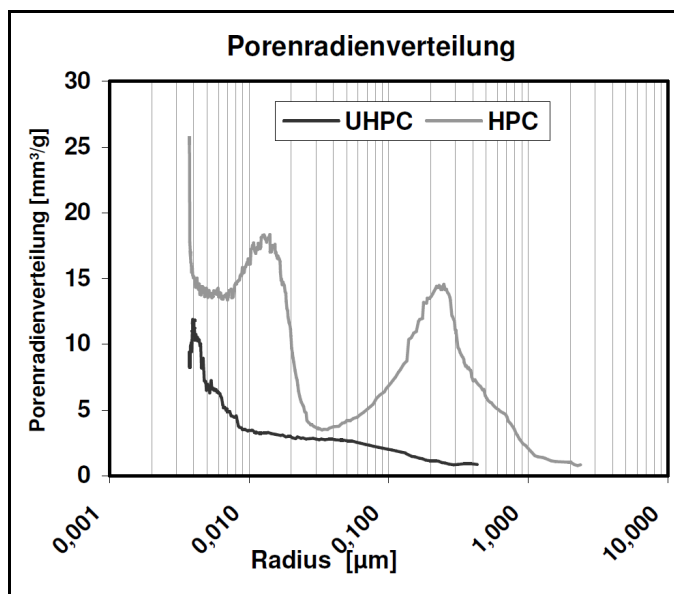
Die Würfeldruckfestigkeit lag nach 28 d beim HPC bei 125 N/mm<sup>2</sup>, beim UHPC bei 167 N/mm<sup>2</sup>. Die Festigkeitsentwicklung zeigt Bild 2. Die Druckfestigkeit des UHPC war in den ersten zwei Tagen ca. doppelt so hoch wie diejenige des HPC. Danach blieb der Unterschied nahezu konstant. Die 28 Tage-Biegezugfestigkeit des mit 1 Vol.-% Stahlfasern (0,15/9 mm) hergestellten HPC erreichte 13 N/mm<sup>2</sup>, beim UHPC 16 N/mm<sup>2</sup>. Sie war damit beim HPC etwa doppelt so hoch, beim UHPC etwa dreimal so hoch wie bei üblichem Straßenbeton. Mittels der Quecksilberdruckporosimetrie wurden das Porenvolumen und die Porenradienverteilung nach 28 Tagen bestimmt.

Bild 3 zeigt die Porenradienverteilung beider Betone. Der HPC enthielt noch etwa 15 mm<sup>3</sup>/g Mikro-kapillarporen (1 µm > Ø > 30 µm). Der UHPC dagegen besaß ausschließlich Mesogelporen. Der ultra-hochfeste Beton ist daher praktisch dicht gegen Diffu-

sion von Feuchtigkeit, Chloridionen und unempfindlich gegen Frost-Tau-Wechsel mit und ohne Tausalz.



**Bild 2:** Zeitliche Entwicklung der Druckfestigkeit der HPC und UHPC-Mischung an 150 mm Würfeln (Mittelwert aus drei Prüfkörpern)



**Bild 3:** Porenradialverteilung HPC u. UHPC

Die Gesamtporosität betrug beim HPC rd. 5,2 Vol-%, beim UHPC war sie mit rd. 1,7 % deutlich kleiner. Mit dem CDF-Verfahren nach Setzer wurden der Wasseraufnahmekoeffizient und die Gesamtabwitterung bei Frost-Tausalz-Beanspruchung an beiden Betonen bestimmt. Der Wasseraufnahmekoeffizient lag bei beiden Betonen unter  $0,040 \text{ kg/m}^2 \text{ h}^{0,5}$  und damit in einem sehr niedrigen Bereich, der für hochfeste und ultrahochfeste Betone üblich ist. Die Gesamtabwitterung war äußerst gering. Sie unterschritt mit rd.  $215 \text{ g/m}^2$  den Grenzwert von  $1500 \text{ g/m}^2$  deutlich.

Der Chlorideindringwiderstand wurde mit dem Schnelltest nach Tang ermittelt. Bei diesem Verfahren wird die Wanderung der Chloridionen durch ein elektrisches Feld angeregt. Bei beiden Betonen wurden keine Ladungen übertragen, d. h. der ultrahochfeste und auch der hochfeste Beton waren bei diesem Test praktisch diffusionsdicht. Als nächstes wurde das Schwindverhalten an Zylindern ( $\varnothing=150 \text{ mm}$ ,  $h=300 \text{ mm}$ ) im Normklima

$20^\circ\text{C} / 65\% \text{ rel. F.}$  nach einem Tag konservierender Lagerung in der Form ermittelt. Das Endschwindmaß lag mit ca.  $0,40 \text{ mm/m}$  bei beiden Betonen ebenfalls in einem für Hochleistungsbetone üblichen Bereich, wobei bei diesem Versuch das autogene Schwinden in den ersten 24 h nicht berücksichtigt wird. Insgesamt dürfte das Schwindmaß bei etwa  $0,7 \text{ mm/m}$  liegen. Die Carbonatisierung wurde nach 28, 90, 180 und 360 an 100 mm-Würfeln bestimmt.

Eine Serie wurde unter Normklima ( $20^\circ\text{C} / 65\% \text{ rel. F.}$ ) gelagert, eine weitere wurde einer Wechsellagerung (4 d Normklima, 3 d Wasserlagerung) unterzogen, da diese den tatsächlichen Klimabedingungen ähnlicher ist. Die UHPC-Probekörper waren in beiden Fällen bis 180 d gar nicht carbonatisiert, die bei  $20^\circ\text{C} / 65\% \text{ rel. F.}$  gelagerten HPC-Probekörper bis in eine Tiefe von rd. 1 mm, die unter Wechselklima gelagerten Proben weniger als 1 mm. Die Versuche werden fortgeführt.

Auf der Grundlage der Schichtdickenbemessung, der Laborversuche und der Belastungsversuche an einem Modellaufbau wurde eine Versuchsstrecke geplant. Vorgesehen war, beide Betone als Trockencompounds vorzufertigen, auf der Baustelle mit mobilen Mischanlagen zu mischen und mit einem üblichen Straßenfertiger in einer Breite von 4 m und in Schichtdicken von 6 und 8 cm einzubauen. In einem Vorversuch mit diesen Geräten wurde festgestellt, dass der Hochfeste Beton weitgehend problemlos hergestellt und verarbeitet werden konnte. Die im Labor fertigergerechte Einbaukonsistenz des UHPC ließ sich mit der mobilen Mischanlage allerdings noch nicht sicher erreichen. Im September 2008 wurde die in Bild 4 beim Bau dargestellte, 225 m lange Versuchsstrecke mit einer Deckschicht aus HPC auf einem Parkstreifen für Lkw des Autobahnparkplatzes "Löwenburg" der BAB A2 nahe Porta Westfalica gebaut.



**Bild 4:** Versuchsstrecke in der Bauphase

Sie wurde in drei je 75 m lange Abschnitte unterteilt, in denen sowohl die Schichtdicke zwischen 60 und 80 mm (siehe Tabelle 1) als auch die Verbindung der Decke zur Betontragschicht variiert wurden. In zwei Abschnitten wurde der HPC mit Stahldübeln verankert (Bild 5), in einem Abschnitt wurde auf dem Unterbeton eine Bitumenemulsion aufgebracht um zu erproben, ob ein teilviskoser "klebender" Verbund erreicht wird.

Das Trockencompound bestand aus Zement, Mikrosilika und Sand, wurde im Trockenmischwerk hergestellt und in wasserdichten BigBags an die Baustelle transportiert. Das Fließmittel auf Basis PCE wurde überwiegend zusammen mit dem Wasser zugegeben, die Stahlfasern und der Basalt 2/8 mm wurden nach Gewicht zudosiert.

**Tabelle 1: Aufbau der Versuchsstrecke**

6/8 cm	Betonfahrbahndecke aus hochfestem Beton (HPC).
18 cm	Betontragschicht C 20/25, Scheinfugen a = 5 m
39 cm	Frostschuttschicht 0/45 (EV <sub>2</sub> ≥ 120 MN/m)
63/65 cm	Gesamtkonstruktion

(Planum EV<sub>2</sub> ≥ 45 MN/m)

Gemischt wurde der Beton in zwei mobilen Mischanlagen, die sich hinsichtlich ihrer Mischwirkung etwas unterschieden. Beide kombinieren das Prinzip eines Freifall- und eines Zwangsmischers.



**Bild 5: Mit Stahldübeln an der Tragschicht verankerte Bewehrung in Betonierabschnitten II und III**

Aufgrund einer gegenüber dem Vorversuch erhöhten Mischgutmenge und der im Tagesverlauf ansteigenden Umgebungstemperaturen wurden der Wassergehalt und die Fließmittelmenge mehrfach angepasst.

Die angestrebte Zielkonsistenz von rd. 35 - 38 cm wurde je nach Wirksamkeit der Mischanlage mit etwas unterschiedlichen Wassergehalten und Mischzeiten von 8 bis 20 min. erreicht.

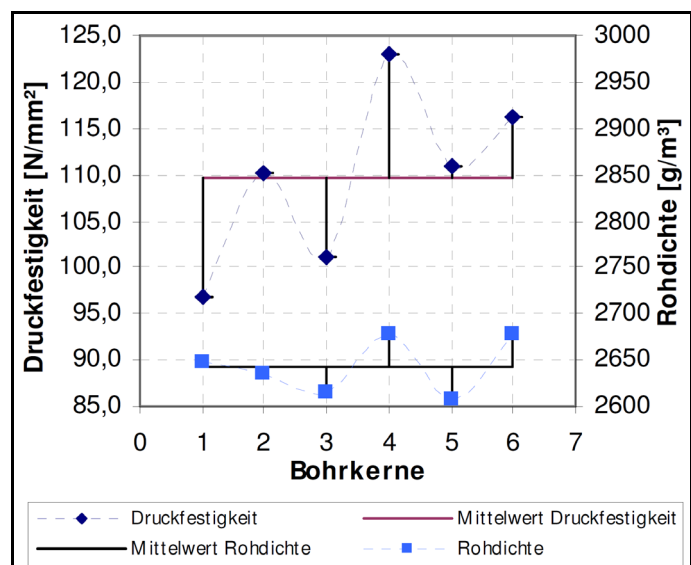
Gemessen wurden das Ausbreitmaß bei jeder Mischung sowie der Frischbeton-Luftgehalt. Zudem wurden Zylinder 150/300 mm für die Druckfestigkeitsprüfung und 150 x 150 x 700 mm Balken zur Prüfung der Biegezugfestigkeit und der Wirksamkeit der Fasern hergestellt.

Die durchschnittliche Druckfestigkeit der Zylinder des Mischfahrzeugs mit der etwas geringeren Mischwirkung betrug aufgrund des höheren Wasserbedarfs nur etwa 94 N/mm<sup>2</sup>. Sie erreichte damit nur etwa 74 % der Festigkeit der Laborprüfkörper.

Die durchschnittliche Druckfestigkeit des im anderen Mischer gemischten Betons lag bei rund 103 N/mm<sup>2</sup>. Die mittlere Rohdichte betrug ca. 2,50 kg/m<sup>3</sup>. Im Labor lag die Rohdichte dagegen immer zwischen 2,55 kg/m<sup>3</sup> und 2,60 kg/m<sup>3</sup>.

Der Einbau erfolgte mit dem in Bild 4 dargestellten Straßenfertiger. Der frische Beton war kantenstabil, die Oberfläche geschlossen und eben.

Auf die Oberfläche wurde ein kombiniertes Mittel zur Nachbehandlung und zur Erhärtungsverzögerung aufgesprüht. Nach einer Wartezeit von rd. 6 - 8 h wurde die Oberfläche ausgebürstet. Die Griffigkeit der so erreichten Waschbetonoberfläche war anforderungsgerecht. 28 Tage nach dem Einbau wurden aus den drei Abschnitten Bohrkerne entnommen. Der Beton war porenarm verdichtet und das Größtkorn gleichmäßig verteilt. Die Bewehrung war vollständig in den Beton eingebettet.



**Bild 6: Druckfestigkeit und Rohdichte der Bohrkerne nach 28 Tagen**

Die Druckfestigkeit der Bohrkerne mit der dazugehörigen Rohdichte ist in Bild 6 dargestellt. Der Mittelwert über alle drei Abschnitte lag etwa bei 110 N/mm<sup>2</sup>. Der Mittelwert von Abschnitt I (Bitumenverklebung, 8 cm Schichtdicke) betrug 114 N/mm<sup>2</sup>, von Abschnitt II (Stahlverankerung, 8 cm Schichtdicke) 112 N/mm<sup>2</sup> und von Abschnitt III (Stahlverankerung, 6 cm Schichtdicke) 104 N/mm<sup>2</sup>. Die mittlere Rohdichte lag bei 2,64 kg/m<sup>3</sup>.

Abgesehen von einem kleinen Bereich, in dem eine Störung in der Betonverarbeitung aufgetreten war, waren nach rd. 100 Tagen insgesamt nur einzelne etwas weiter geöffnete Risse sichtbar. Dies bedeutet, dass die kombinierte Bewehrung mit Bewehrungsmatten und etwa 1 Vol.-% kurzer Stahlfasern die Schwind- und Temperaturspannungen wirksam aufnehmen konnte und die Rissbreite wie vorgesehen begrenzt wurde.

Die Versuchsstrecke wird in den nächsten Jahren weiter hinsichtlich Rissbildung, Festigkeitsentwicklung, Chloriddiffusion und Frost-Tausalz-Widerstand überwacht. Von der Bundesanstalt für Straßenwesen werden ergänzend zu diesem Projekt die Tragfähigkeit mit dem Falling Weight Deflektometer und die Griffigkeit gemessen.

## 4 Folgerung für die Praxis

In diesem Forschungsprojekt wurde ein Straßenaufbau mit einer nur 6 bis 8 cm dicken und dennoch hoch tragfähigen, fugenlosen Deckschicht aus durchgehend bewehrtem hochfesten Faserbeton mit einer Druckfestigkeit von etwa 100 bis 120 N/mm<sup>2</sup> entwickelt und auf einer Versuchsstrecke mit einem üblichem Betondeckenfertiger eingebaut.

Die neue Bauweise ist in erster Linie dafür gedacht, ermüdete Fahrbahnaufbauten dauerhaft instand zu setzen oder unterdimensionierte Abschnitte vorbeugend zu verstärken.

Zudem wurden die baustofftechnologischen und theoretischen Grundlagen auch für die Verwendung von ultra-hochfesten Beton für diese neue "Whitetopping"-Bauweise erforscht. Untersucht wurden:

- im Labor die geeignete Zusammensetzung der Betone und ihr Verhalten unter Last und unter Witterungsbeanspruchung,
- mit modifizierten FE-Programmen die Beanspruchung unter Lkw-Rädern, um die Aufbaudicke festzulegen,
- das Verhalten eines praxisnahen Modellaufbaus unter dynamischer Belastung mit 2 Mio. Lastwechseln (60 oder 70 kN) in einem Großversuchsstand,
- sowie die Herstellung und die Verarbeitbarkeit der bei den Betone (HPC und UHPC) mit mobilen Mischfahrzeugen und mit einem Straßenfertiger unter realen Baustellenbedingungen.

Auf der Grundlage dieser umfangreichen Voruntersuchungen wurde im September 2008 mit Unterstützung des Landes Nordrhein-Westfalen eine rd. 225 m lange Versuchsstrecke auf einem Autobahnparkplatz gebaut.

Deckschicht aus faserhaltigem HPC konnte mit einem Straßenfertiger problemlos eingebaut werden. Hinsichtlich der Verwendung des noch gefügedichteren ultra-hochfesten Betons besteht dagegen noch Optimierungsbedarf.

In die Oberfläche ließ sich mittels Oberflächenverzögerer und anschließend Ausbürsten eine Waschbetonstruktur einbringen. Bedingt durch das spätere Erhärten des fließmittelreichen Betons müssen allerdings längere Wartezeiten bis zum Ausbürsten eingeplant werden.

HPC und UHPC sind aufgrund ihres höheren Feinstkorngehalts und der niedrigeren w/z-Werte schwerer mischbar als üblicher Straßenbeton. Die Mischanlage und der Mischvorgang müssen darauf abgestimmt werden.

Die Versuchsstrecke wird von der Bundesanstalt für Straßenwesen und der Universität Kassel weiter betreut, um das Langzeitverhalten des Aufbaus unter realen Verkehrs- und Witterungsbedingungen festzustellen.

## 5 Literatur

- [1] Knutson, M. J. (1996); American Concrete Pavement Association (ACPA): Whitetopping - the road to industry renewal, Pavement profiles.
- [2] Deutsches Institut für Normung (DIN) (2008): DIN 1045-2, Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton, Teil 2: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität, Berlin.
- [3] Fehling, E. ; Schmidt, M. ; Teichmann, T. (u.a.) (2005): Entwicklung, Dauerhaftigkeit und Berechnung Ultra-Hochfester Betone (UHPC), (Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau ; 1), Forschungsbericht DFG FE 497/1-1.
- [4] Schmidt C. ; Riedl, S. ; Geisenhanslüke, C. (u.a.) (2008): Strengthening and Rehabilitation of Pavement Applying Thin Layers of UHPFRC (UHPC-White topping), in: Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete (UHPC) March 05.07.2008, S. 655-662 (Schriftenreihe Baustoffe und Massiv ; 10 ).