

Verschleißfeste Schutzschichten aus UHPC

B. Sagmeister, G. Pahl

Zusammenfassung Ultra High Performance Concrete oder kurz UHPC zeichnet sich neben einer hohen Festigkeit durch eine hohe Widerstandsfähigkeit gegen Beanspruchung aus Abrieb und Abwitterung auf. Dank langjähriger Forschung und Erfahrungen aus Anwendungsprojekten kann der innovative Werkstoff in Ingenieurbauwerken effizient eingesetzt werden. Der Beitrag beschreibt für eine definierte UHPC-Rezeptur die durchgeführten Laboruntersuchungen und den Einsatz als verschleißfeste Schutzschicht bei einer Brücke sowie einer Wehranlage.

Protective Layers made of UHPC

Abstract Ultra High Performance Concrete, or UHPC for short, is not only characterized by its high strength but has also a high resistance against abrasion and frost. Many years of research and experience from application projects have made this innovative material suitable for efficient use in engineering structures. The article describes the laboratory investigations for a certain UHPC-recipe and two applications in practice for a bridge and for a weir system.

1 Einleitung

Ultra High Performance Concrete (UHPC) zeichnet sich durch eine hohe Dichte und geringe Porosität des Zementsteines aus. Dadurch steigt nicht nur die Druckfestigkeit des Betons. Die Frost-Tausalz Beständigkeit und die Abriebfestigkeit wird deutlich verbessert. Der Widerstand gegen Karbonatisierung sowie gegen das Eindringen von Chloriden steigt. Da UHPC mit Materialpreisen von 250 €/m³ bis 2 000 €/m³ (je nach Fasergehalt) sehr teuer ist, bietet es sich an, nur eine äußere, vorgesetzte Schutzschicht aus diesem hochwertigen Material zu fertigen und im Inneren der Bauteile Standardbeton nach Norm zu verwenden. Beim Nachweis der Tragfähigkeit wird die Schutzschicht nicht als tragender Querschnitt herangezogen und es kann auf die derzeit noch erforderliche Zustimmung im Einzelfall für derartige Sonderbetone verzichtet werden.

2 Bindemittel und Betonherstellung

Der im Beitrag beschriebene Beton wird mit dem seit zehn Jahren bewährtem Bindemittel Nanodur Compound 5941 der Firma Dyckerhoff GmbH hergestellt [1], [2]. Bei Rezepturen mit diesem Bindemittel werden nicht Silikastaub, Metakaolin oder Flugasche eingesetzt, um die Zwickel zwi-

schen den Zementpartikeln zu verfüllen. In einem speziellem Sieb werden nach der Zementmühle Zementkörner mit je einem Durchmesser von $\leq 16,0\mu\text{m}$, $9,5\mu\text{m}$ und $6,0\mu\text{m}$ abgetrennt. In einem zweiten Arbeitsschritt werden diese drei Fraktionen feinstgemahlener Zementpartikel mit anderen Zementen zu einem Bindemittel mit genau definierter Sieblinie zusammengesetzt. Zusätzlich werden dem Bindemittel synthetische Oxide im nanoskaligen Bereich zugefügt. Diese Oxide optimieren das Kornband und steuern die Hydratation des Zementes. Um die Anwendung zu erleichtern, enthält die Bindemittelmischung auch alle anderen benötigten feinen, staubförmigen Bestandteile wie zum Beispiel Quarzmehle mit einem Korndurchmesser $\leq 0,125\text{mm}$, sodass das verarbeitende Transportbeton- oder Fertigteilwerk lediglich ein freies Silo benötigt, um die UHPC-Mischung herzustellen [5]. Durch die Vormischung der trocknen Bestandteile im Zementwerk ist jeder handelsübliche Mischer, sogar ein Freifallmischer, zur Herstellung von UHPC geeignet. Dabei ist zu beachten, dass je nach Leistung des Mixers nicht die Nennfüllung, sondern lediglich die halbe Nennfüllung in einer Charge verarbeitet werden kann. Aufgrund der Wirkungsdauer der verwendeten PCE-Fließmittel sind Mischzeiten von acht bis zwölf Minuten pro Charge erforderlich. Da die Wirksamkeit der PCE von der Temperatur abhängt, sollte die Frischbetontemperatur unter 30 °C bleiben.

3 Untersuchte Rezepturen und ihre Eigenschaften

Die selbstverdichtende Nanodur-Standardrezeptur, ihre Zusammensetzung, Eigenschaften, Besonderheiten sowie Herstellung und Anwendung wird ausführlich in [4] und [5] vorgestellt. Die labormäßigen Untersuchungen bezüglich der Dauerhaftigkeit fanden im Rahmen des Forschungsprojektes OLAF [6] und an der TU Kaiserslautern [7] an folgenden Rezepturen der **Tabelle 1** statt. In **Tabelle 2** sind die Prüfergebnisse an Probekörpern (ohne Stahlfasern) bezüglich der Dauerhaftigkeit angegeben. Diese untersuchten Rezepturen wurden vor allem auf größtmögliche Formtreue, Geometrie Konstanz und Oberflächenqualität der fertigen Betonkörper für unterschiedliche Anwendungen entwickelt. Die herausragenden Werte bezüglich der Dauerhaftigkeit und des Abriebwiderstandes sind ein Nebeneffekt des UHPCs, welche standardmäßig im Prüfprogramm erfasst worden sind.

Für die in diesem Bericht beschriebenen technischen Anwendungen wurde die Rezeptur mit Grauzement gemäß Spalte 5 der **Tabelle 1** verwendet. Für den quarzitischen Grubensand und Basaltsplitt wurden lokal verfügbare, gleichwertige Natursteinkörnungen eingesetzt.

Die Carbonatisierungstiefe ist verglichen mit Normalbeton sehr gering. Der Migrationskoeffizient ist mindestens um den Faktor acht kleiner als der zulässige Mittelwert für die strengste Expositionsklasse XS 3, XD 3 gemäß BAW Merkblatt [8]. Die Abwitterung beim Capillary Suction of Deicing chemicals and Freeze-Thaw Test (CDF-Verfahren) [9] ist 16-mal kleiner als der als unkritisch betrachtete Grenzwert von 1 500 g/m² gemäß [10]. Der relative dynamische E-Mo-

Dr.-Ing. Bernhard Sagmeister

Sagmeister@durcrete.de

Durcrete GmbH

Am Renngraben 7, 65549 Limburg an der Lahn

Gerhard Pahl

info@drschoetz-ingenieure.de

Dr. Schütz Ingenieure

An der Stadtmauer 13, 87435 Kempten (Allgäu)

Tabelle 1. Untersuchte Rezepturen
Table 1. Tested recipes

Inhaltsstoff	Einheit	Rezeptur mit Grauzement nach [6], Tabelle 4	Rezeptur mit Weißzement nach [7] Tabelle 4.6
Nanodur Compound 5941 grau oder weiß	kg/m ³	1 050	1 042
Quarzsand 0/2	kg/m ³	392	426
Basaltsplitt 2/5 oder 1/3	kg/m ³	845	882
Wasser	kg/m ³	152,5	160,0
PCE Fließmittel	kg/m ³	12,4	20,3
Schwindreduzierer	kg/m ³	-	8,0
w/z-Wert inkl. PCE Anteil		0,26	0,28

Tabelle 2. Ergebnisse der Dauerhaftigkeitsuntersuchungen
Table 2. Durability test results

Prüfung	Rezeptur mit Grauzement [6]	Rezeptur mit Weißzement [7]
Carbonatisierungstiefe nach 70 Tagen Lagerung bei 4 % CO ₂	0 mm	Nicht ermittelt
Carbonatisierungstiefe nach 180 Tagen Lagerung bei 2 % CO ₂	Nicht ermittelt	1,85 mm
Migrationskoeffizient D _{Cl} Chlorideindringwiderstand nach BAW-Merkblatt [8]	1,1 x 10 ⁻¹³ m ² /s	6,2 x 10 ⁻¹³ m ² /s
Abwitterung nach 28 Frost-Tau-Wechsel nach dem CDF-Verfahren [9]	90 g/m ²	Nicht ermittelt
Abfall des dyn. E-Moduls nach CIF-Verfahren mit 56 Frost-Tau-Wechsel	Keine innere Schädigung, kein Abfall des dyn. E-Moduls	Nicht ermittelt

Tabelle 3. Abriebfestigkeit
Table 3. Wear resistance

	Einheit	Rezeptur Abriebversuche
Nanodur Compound 5941 grau	kg/m ³	1 048
Quarzsand 0/2	kg/m ³	426
Basaltsplitt 2/5	kg/m ³	879
Wasser	kg/m ³	154,5
PCE Fließmittel	kg/m ³	13,9
Schwindreduzierer	kg/m ³	6,0
w/z-Wert inkl. PCE Anteil		0,26
Volumenverlust nach Böhme Vorlagerung in Normklima 20°/65 %	cm ³ /50 cm ²	9,3
Volumenverlust nach Böhme Vorlagerung in Wasser	cm ³ /50 cm ²	10,40
Volumenverlust nach Böhme Vorlagerung in Ethylalkohol	cm ³ /50 cm ²	11,58

dul an Probekörpern mit 56 Frost-Tau-Wechseln gemäß dem Capillary suction, Internal damage and Freeze-thaw test (CIF-Verfahren) zeigt keinen fallenden Wert, gemäß [10] wäre ein Abfall auf 75 % des Ausgangswerts noch ein hinreichendes Abnahmekriterium.

An einer ebenfalls selbstverdichtenden, leicht abweichenden Rezeptur gemäß Tabelle 3 wurden am Wilhelm-Dyckerhoff-Institut in Wiesbaden (WDI) Abriebversuche nach DIN 52108, Prüfverfahren nach Böhme [11] durchgeführt. Gemessen wurde der mittlere Volumenverlust nach einer 25-tägigen Vorlagerung in unterschiedlichen Medien an jeweils drei Probekörpern.

Der Grenzwert für die strengste Widerstandsklasse 4 gemäß EN 15748-2 Terrazzoplatten im Außenbereich [12] ist ein Abrieb kleiner 18 cm³/50 cm². Weitere Versuche des WDI zeigen, dass durch Austausch des Naturgesteins „Basalt“ mit dem industriell hergestellten Zuschlag durigid ([4]) der Volumenverlust nach Böhme auf Null gebracht wird. Diese künstliche, mineralische Gesteinskörnung ist so hart, dass der Beton die metallene Böhme-Scheibe zerkratzt, abschleift und zerstört.

4 Derzeitiger Einsatz von UHPC bei Brückenbauwerken in Deutschland

Bei den im deutschsprachigen Raum bekannten Anwendungen von UHPC im Brückenbau wird vor allem die hohe Festigkeit ausgenutzt, um wie bei der Gärtnerplatzbrücke in Kassel [13] schlanke Querschnitte darstellen zu können. Wirtschaftlich erfolgreicher ist jedoch die traglaststeigernde Wirkung von dünnen UHPC-Deckschichten, welche gleichzeitig die Funktion der Abdichtung übernehmen. Bei Spannbetonbrücken entfällt die bituminöse Tragschicht und die Abdichtung. Die stattdessen eingebaute 5 cm bis 10 cm dicke, bewehrte und faserverstärkte UHPC-Deckschicht mit Verbund zur Betonkonstruktion erhöht die statische Nutzhöhe und somit die Tragfähigkeit. Bei Stahlbrücken [14] wird die UHPC Deckschicht ebenfalls im Verbund zur Stahloberfläche aufgebracht. Dabei verringert diese Bauweise durch die Erhöhung der statischen Höhe nicht nur die globalen Spannungen. Auch die lokalen Spannungen aus Reifendruck werden verringert, da sich die Lasteinleitungsfläche durch die aufgebraute UHPC-Deckschicht vergrößert und die Spannungen in den Deckblechen entsprechend verringert. Diese Bauweise ist in Österreich [15], in der Schweiz [16] und in den Niederlanden [17] weit verbreitet. In Deutschland wurde 2017 mit Unterstützung aus der Schweiz der Ersatzneubau B27 ÜF L3378 bei Fulda-Lehnerz mit dieser Bauweise hergestellt. Die Rheinbrücke Maxau bei Karlsruhe wird im Winter 2018/2019 mit einem ähnlichen System eines dänischen Herstellers saniert.

Bei den im deutschsprachigen Raum bekannten Anwendungen von UHPC im Brückenbau wird vor allem die hohe Festigkeit ausgenutzt, um wie bei der Gärtnerplatzbrücke in Kassel [13] schlanke Querschnitte darstellen zu können. Wirtschaftlich erfolgreicher ist jedoch die traglaststeigernde Wirkung von dünnen UHPC-Deckschichten, welche gleichzeitig die Funktion der Abdichtung übernehmen. Bei Spannbetonbrücken entfällt die bituminöse Tragschicht und die Abdichtung. Die stattdessen eingebaute 5 cm bis 10 cm dicke, bewehrte und faserverstärkte UHPC-Deckschicht mit Verbund zur Betonkonstruktion erhöht die statische Nutzhöhe und somit die Tragfähigkeit. Bei Stahlbrücken [14] wird die UHPC Deckschicht ebenfalls im Verbund zur Stahloberfläche aufgebracht. Dabei verringert diese Bauweise durch die Erhöhung der statischen Höhe nicht nur die globalen Spannungen. Auch die lokalen Spannungen aus Reifendruck werden verringert, da sich die Lasteinleitungsfläche durch die aufgebraute UHPC-Deckschicht vergrößert und die Spannungen in den Deckblechen entsprechend verringert. Diese Bauweise ist in Österreich [15], in der Schweiz [16] und in den Niederlanden [17] weit verbreitet. In Deutschland wurde 2017 mit Unterstützung aus der Schweiz der Ersatzneubau B27 ÜF L3378 bei Fulda-Lehnerz mit dieser Bauweise hergestellt. Die Rheinbrücke Maxau bei Karlsruhe wird im Winter 2018/2019 mit einem ähnlichen System eines dänischen Herstellers saniert.

5 Neues Anwendungsgebiet für UHPC am Beispiel der Walsenbrücke in Oberstdorf

Bei der Walsenbrücke (Bild 1, Bild 2), am Ortsrand von Oberstdorf, wurde UHPC nicht aus Gründen der Tragfähigkeit eingesetzt. Wichtigstes Kriterium für den Einsatz des Sonderbetons war die hohe Widerstandsfähigkeit der Bauteile und die zu erwartende Lebensdauer des Bauwerks. Die Brücke dient als Hauptstraßenverbindung nach Oberstdorf aus westlicher Richtung und als wichtige Verbindung in die Skigebiete, zur Skiflugschanze, zum Langlaufstadion, sowie ins Kleinwalsertal. Sie überbrückt die Stillach, weshalb dem Bauwerk eine wichtige Funktion beim Hochwasserschutz zukommt. Die neue Brücke ersetzt eine Vorgängerbrücke aus dem Jahr 1959. Insbesondere durch Frost- und Tausalzeinwirkung waren am alten Bauwerk massive

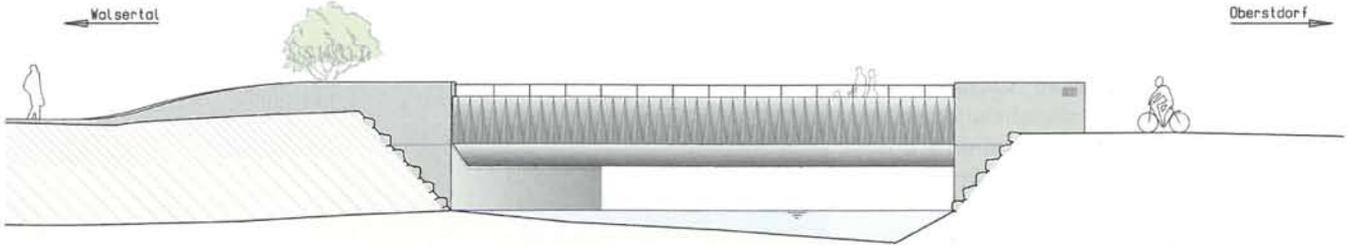


Bild 1. Walserbrücke Oberstdorf, Entwurfszeichnung
 Fig. 1. Walser Bridge in Oberstdorf/Germany, concept drawing

(Abb.: Dr. Schütz Ingenieure)
 (Source: Dr. Schütz Ingenieure)

Tabelle 4. Technische Daten der neuen Brücke
 Table 4. Technical data of the new bridge

Brückensklasse	DIN EN 1991-2 + NA
Statisches System	Integrale Stahlbetonrahmenbrücke
Stützweite	15,52 m
Lichte Höhe	1,60 m (Normalwasserstand)
Fahrbahnbreite	7,80 m
Breite zwischen Geländer	12,30 m
Gesamtlänge	17,40 m
Brückenfläche	214 m ²
Kreuzungswinkel	78,30 gon

Schäden entstanden, sodass eine Sanierung der Brücke nicht mehr sinnvoll möglich beziehungsweise nicht mehr wirtschaftlich war. Deshalb beschloss die Marktgemeinde Oberstdorf die Brücke im Jahre 2017 zu erneuern. Die technischen Daten für diesen Brückeneubau sind in **Tabelle 4** aufgeführt.

Beim Neubau der Walserbrücke sollte es sowohl in den Bauphasen als auch im Endzustand zu keinen erheblichen Auswirkungen auf den Hochwasserabfluss kommen. Die bestehende Brücke ist ein wesentlicher Bestandteil des planfestgestellten Hochwasserschutzes an der Stillach. Der auf der Südwestseite anschließende Hochwasserschutzdeich wird mithilfe der Brückenbrüstung über das Bauwerk verlängert. Im Hochwasserfall kommt es durch den geringen Durchflussquerschnitt im Brückenbereich zu einem gewollten Wasserrückstau, sodass der oberstromig vorgesehene Retentionsraum (Lusswiesen) über eine Scharte im östlichen Deichufer geflutet wird.

Aufgrund der wasserrechtlichen Genehmigung musste die Überbauunterseite als glatte Scheibe ausgebildet werden. Das neue Brückengeländer musste geschlossen hergestellt werden. Aufgrund des zu erwartenden Anpralls durch Treibholz sowie eine sehr hohe Tausalzbelastung war eine besonders robuste Ausführung der Geländer erforderlich. Die Vorgaben für den Entwurf waren komplexer als es die verhältnismäßig kleine Bauaufgabe erwarten ließ. Wesentliche Entwurfsidee von Dr. Schütz Ingenieure aus Kempten war es ein möglichst robustes und dauerhaftes Bauwerk zu schaffen. So entstand die Idee zum Einsatz von UHPC. Um Kosten zu sparen bot es sich an, nur eine äußere, vorgesetzte Schicht der Brüstungen aus diesem hochwertigen Material zu fertigen und im Inneren der Bauteile Standardbeton nach Norm zu verwenden (**Bild 3**). Die Sichtflächen der Widerlager, Brüstungsmauern und Winkelstützmauer wurden mit einer sägerauen, vertikalen Holzschalung hergestellt. Darüber hinaus wurden die sichtbaren Oberflächen der



Bild 2. Walserbrücke Oberstdorf, Ansicht von oben
 Fig. 2. Walser Bridge in Oberstdorf/Germany, aerial view

(Abb.: Rainer Retzlaff)
 (Source: Rainer Retzlaff)

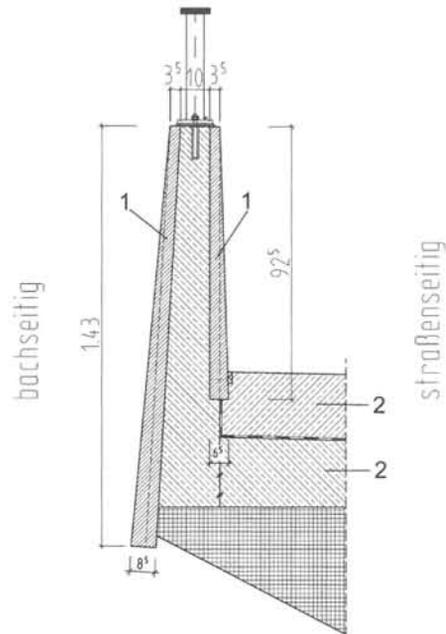


Bild 3. Geländer/Brüstungsdetail Pos 1 UHPC, Pos 2 Beton nach Norm
 (Abb.: Dr. Schütz Ingenieure)

Fig. 3. Railing detail, Item 1 UHPC, Item 2 regular concrete
 (Source: Dr. Schütz Ingenieure)

Brüstungsmauern beziehungsweise der Flügelwände und der Winkelstützmauer durch Sandstrahlen noch weiter nachbearbeitet (Bild 4). Die UHPC-Fertigteilelemente der Stahlbetonbrüstung am Überbau (Pos 1, Bild 3) wurden an der Oberfläche mit dreiecksförmigen Reliefelementen strukturiert. Zur Erhöhung des Frost-Tausalzwidehstands wurden die Kappen und die Brüstungsmauern mit Luftporenbeton hergestellt. Die Bewehrung der Kappen und der Brüstungsmauern sowie die Anschlussbewehrung der Brüstungsmauern im Bereich der UHPC Schalen wurden verzinkt ausgeführt. Die UHPC-Fertigteile wurden im Betonsteinwerk R. Bayer in Munderkingen gefertigt.

6 Anwendung bei einer Wehranlage

In Zabeltitz nördlich von Großenhain gibt es eine barocke Gartenanlage. Zur Wasserhaltung in den umfangreichen Naturschutzgebieten existiert ein komplexes System an Wehren, welche die Flüsschen Röder und kleine Röder aufstauen. Im Rahmen der Flurbereinigung wurde ein aus dem Anfang des 19. Jahrhunderts errichtetes Wehr neu gebaut. Aus Gründen der Langlebigkeit entschied sich die Ingenieurgesellschaft Inros Lackner SE aus Dresden, hoch beanspruchte Bauteile mit einer UHPC Schutzschicht herzustellen [18]. Gewählt wurde die Rezeptur mit Grauzement gemäß Spalte 3 der Tabelle 1. Es wurden halb- und viertelkreisförmige Halffertigteile (Bild 5) entworfen, welche im Betonwerk Bad Lausick hergestellt wurden. Wegen Bauverzögerungen lagerten diese Teile einen Winter im Freien, bevor Sie in die vor Ort errichtete Schalung eingebracht und der tragende Beton dagegen gegossen wurde. Der Verbund zwischen Fertigteil und Ortbeton wurde mittels einer rauen Anschlussfuge sowie durchgehender, konventioneller Bewehrung sichergestellt. Auf Bild 5 deutlich zu erkennen ist die bläuliche Farbe und leicht spiegelnde, glatte Oberfläche der UHPC Halffertigteile im Gegensatz zu dem grauen Ortbeton der tragenden Struktur. Diese Farbe ist auf den Hüttensandanteil im Bindemittel zurückzuführen und verschwindet üblicherweise schnell, wenn der Luftsauerstoff mit den Inhaltsstoffen des Betons reagiert und die Farbe abgebaut wird. Bei diesem hier verwendeten UHPC ist jedoch die Gefügestruktur derart dicht, dass nur wenig Bestandteile der Luft in den Beton eindringen und die Verfärbung erst nach Jahren oder gar nicht verblasst.

Neben dem Einsatz von UHPC war die Baustelle trotz des bachartigen Charakters der benachbarten Fließgewässer mit den umfangreichen Rammarbeiten, der Vielzahl an Spundwänden und einer permanenten Was-

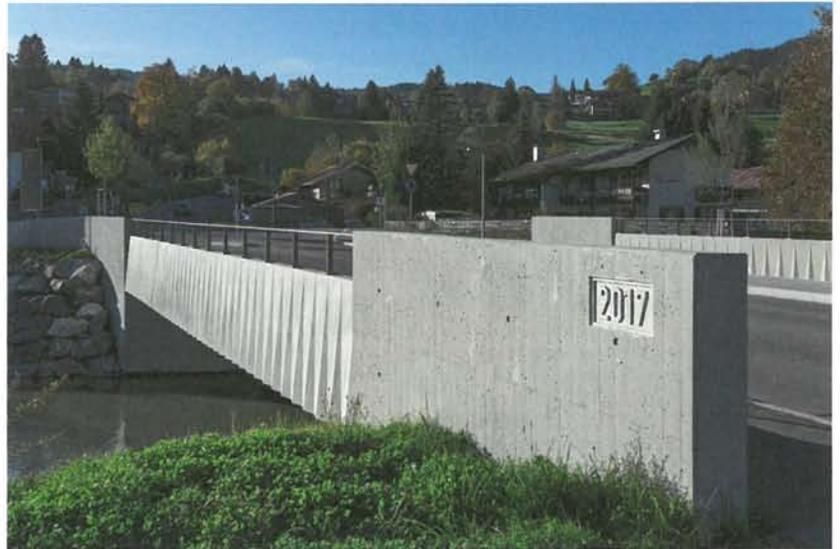


Bild 4. Walserbrücke Oberstdorf
Fig. 4. Walser Bridge in Oberstdorf/Germany

(Abb.: Rainer Retzlaff)
(Source: Rainer Retzlaff)



Bild 5. Wehranlage Zabeltitz mit UHPC-Vorsatzschalen
Fig. 5. Weir in Zabeltitz/Germany with UHPC protective layers

(Abb.: Bernhard Sagmeister)
(Source: Bernhard Sagmeister)



Bild 6. Baustellenansicht Wehranlage Zabeltitz
Fig. 6. Site view of weir in Zabeltitz/Germany

(Abb.: Bernhard Sagmeister)
(Source: Bernhard Sagmeister)

serhaltungen (Bild 6) eine schwierige Bauaufgabe. Mit der ausgeführten dauerhaften und robusten Betonkonstruktion ist man sicher, dass diese Bauaufgabe über viele Jahrzehnte Bestand haben wird und nur die stählernen und deshalb korrosionsanfälligen Wehre und Hebeeinrichtungen regelmäßig ersetzt werden müssen. Der eingesetzte UHPC ist kein preiswerter Baustoff. Durch seinen Einsatz als Vorsatzschale im am meisten beanspruchten Bereich ist er dennoch wirtschaftlich und erhöht die Lebensdauer um ein Vielfaches.

7 Fazit

Ultra-High-Performance Concrete zeigt einen hohen Widerstand gegen Carbonatisierung und das Eindringen von

Chloriden, so gut wie keine Abwitterung bei Frost-Tausalz-Angriff und eine gute Beständigkeit gegen Abrieb. Um robuste und unterhaltarme technische Bauwerke zu erreichen, muss nicht die ganze Konstruktion aus diesem hochwertigen Beton hergestellt werden. Wenige Zentimeter dicke Schutzschichten, welche zusätzlich als verlorene Schalung eingesetzt werden können, sind hierfür häufig ausreichend. Die gewählten Ausführungsbeispiele zeigen wie Kosten minimiert werden können, die Lebensdauer und Robustheit erhöht werden und dabei ein verantwortungsvoller Umgang mit Ressourcen gepflegt wird. Hier wurden mit Innovationskraft beispielhafte Projekte für zukünftige Anwendungsgebiete von UHPC verwirklicht.

Literatur

- [1] Deuse, Th.; Mutke, S.; Parker, F. et al.: Nanotechnically optimized binders for the production of user-friendly high-performance concrete – part 1. In: *Cement International*, Vol. 16 (2018), Iss. 1, pp. 58–69.
- [2] Deuse, Th.; Mutke, S.; Parker, F. et al.: Nanotechnically optimized binders for the production of user-friendly high-performance concrete – part 2. In: *Cement International*, Vol. 16 (2018), Iss. 5, pp. 64–77.
- [3] Albrock, O.; Böing, R.; Rothenbacher, W. et al.: Praxistest ultrahochfester Beton im Transportbetonwerk. In: *Beton* 63 (2013), Heft 6, S. 226–231.
- [4] Sagmeister, B.: Maschinenteile aus zementgebundenem Beton. Beuth Verlag, Berlin, 2017.
- [5] Sagmeister, B.: UHPC-Beton im Maschinenbau. In: *Beton* 68 (2018), Heft 12, S. 476–478.
- [6] Deuse, T.: Hochleistungsbeton für Alle – Nanotechnologisch optimierter, langlebiger, energieeffizienter und insbesondere anwendungsfreundlicher Hochleistungsbeton – OLAF : Abschlussbericht ; Teilprojekt der Dyckerhoff AG ; BMBF Förderbekanntmachung: „Nanotechnologie im Bauwesen – NanoTecture: Erschließung höherer Ressourcen-/Energieeinspar- und Leistungspotenziale sowie neuer Funktionalitäten“, Schwerpunkt: Materialentwicklung, Laufzeit: 01.02.2009–30.04.2012, <https://www.baufachinformation.de/hochleistungsbeton-fuer-alle-na-notechnologisch-optimierter-langlebiger-energieeffizienter-und-insbesondere-anwendungs-freundlicher-hochleistungsbeton-olaf%3C-b%3E/bu/2015109015765> [Zugriff am 20.02.2019].
- [7] Müller, S.: Zur Auslegung von innovativen Betonkollektorelementen für solarthermische Parabolrinnenkraftwerke. Schriftenreihe Bauingenieurwesen der Technischen Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern, Heft 22, Dissertation, 2016, <https://kluedo.ub.uni-kl.de/frontdoor/index/index/year/2016/docId/4362> [Zugriff am: 14.09.2018].
- [8] Bundesanstalt für Wasserbau: BAW Merkblatt Chlorideindringwiderstand von Beton (MCL). Karlsruhe, 2012.
- [9] DIN CEN/TS 12390-9: Prüfung von Festbeton – Teil 9: Frost- und Frost-Tausalz Widerstand – Abwitterung. Deutsche Fassung CEN/TS 12390:2016, Ausgabe Mai 2017.
- [10] Bundesanstalt für Wasserbau: BAW Merkblatt Frostprüfung von Beton (MFB). Karlsruhe, 2012.
- [11] DIN 52108: Prüfung anorganischer nichtmetallischer Werkstoffe – Verschleißprüfung mit der Schleifscheibe nach Böhme – Schleifscheiben-Verfahren, Ausgabe Mai 2010.
- [12] DIN EN 13748-2: Terrazzoplatten – Teil 2: Terrazzoplatten für die Verwendung im Außenbereich, Deutsche Fassung EN 13748-2:2004, Ausgabe März 2005.
- [13] Schmidt, M.; Bunje, K.; Fehling, E. et al.: Brückenfamilie aus Ultra-Hochfestem Beton in Niestetal und Kassel. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 101 (2006), Heft 3, S. 198–204.
- [14] Laurini, G.: Tragplatte der Ewijk-Brücke verstärkt: Decklage aus hochfestem Beton. In: *Beton* 68 (2018), Heft 6, S. 234–235.
- [15] Pilch, E.; Hadl, P.: Planung von Ertüchtigungs- und Adaptierungsmaßnahmen sowie Bauausführung eines UHPFRC-Aufbeton-Pilotprojekts im hochrangigen Straßennetz von Österreich. In: *Beton* 59 (2014), Heft 9, S. 338–343.
- [16] Denarié E.; Brühwiler E.: Cast-on site UHPFRC for improvement of existing structures – achievements over the last 10 years in practice and research. In: Reinhardt, H. W.; Parra-Montesinos, G. J.; Garrecht, H. (eds.): HPRCC7 7th RILEM workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites. Stuttgart, June 2015, pp. 473–480.
- [17] Kaptijn, N.; Blom, J.: A new bridge deck for the Kaag bridges. In: Schmidt, M.; Fehling, E.; Geisenhanslüke, C. (eds.): Ultra High Performance Concrete (UHPC): Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, September 2004, pp. 49–57.
- [18] Koban, M.; Sagmeister, B.: Verschleißfeste Schutzschichten aus UHPC. In: 42. Dresdner Wasserbaukolloquium des Instituts für Wasserbau und Technische Hydromechanik, Dresden, 2019.