

Textilbewehrter Oberbeton als Basis für eine fugenlose Oberfläche von Betonfahrbahnen

FA 8.249

Forschungsstellen: Ruhr-Universität Bochum, Institut für Konstruktiven Ingenieurbau (Prof. Dr.-Ing. R. Breitenbücher)

Technische Universität Dresden, Institut für Massivbau (Prof. Dr.-Ing. M. Curbach)

Bearbeiter: Baumgärtel, E. / Neumann, J.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Bonn

Abschluss: Februar 2021

1 Grundsätzliches Konzept

In unbewehrten Betonfahrbahndecken stellen die Fugen stets eine Schwachstelle dar, die intensiver Wartung und Instandhaltung bedürfen. Alternativ zu den klassischen Fugenabdichtungen mit Heiß- beziehungsweise Kaltvergussmassen wurde im vorliegenden Forschungsvorhaben eine alternative Lösung untersucht, Fugen in solchen Flächen dauerhaft abzudichten. Basis dazu ist, die Fugen im Unterbeton mit einer durchgängigen, dünnen, fugenlosen, carbonbewehrten Oberbetonschicht (Carbon Reinforced Concrete = CRC) zu überdecken und damit dauerhaft abzudichten (Bild 1).

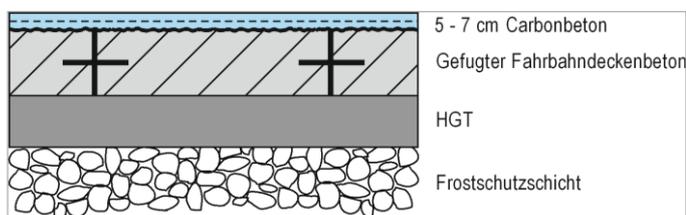


Bild 1: Schema des Verbundsystems "gefugter Unterbeton – carbonbewehrter Oberbeton"

Kernstück dieses Prinzips ist es, die in den Unterbetonfugen unabdingbar auftretenden Verformungen im Oberbeton in zahlreiche feine Risse zu überführen. Dadurch wird auch das Eindringen von Wasser und anderer flüssiger Medien wie Tausalzungen in die Konstruktion vermieden. Neben einer entsprechenden Bewehrung muss aber auch eine adäquate freie Strecke für die Rissbreitenverteilung zur Verfügung stehen. Dazu muss der Verbund zwischen Ober- und Unterbeton beidseits der Fuge auf eine gewisse Distanz unterbrochen werden. Gleichzeitig gilt es, eine fortschreitende Delamination über die freie Strecke zu vermeiden.

Anzustreben ist, die Dicke der Oberbetonschicht auf nur wenige Zentimeter zu begrenzen. Durch die Verwendung der korrosionsunempfindlichen Carbonbewehrung ist dies sowohl bei Instandsetzungen bestehender Betondecken als auch bei Neubaumaßnahmen denkbar.

Im vorliegenden Forschungsvorhaben wurde untersucht, inwieweit dieses Prinzips machbar beziehungsweise in die Praxis umsetzbar ist. Das Hauptaugenmerk der Untersuchungen lag dabei zum einen auf der Rissentwicklung in der Carbonbetonschicht, auf der anderen Seite im Verbund zwischen Ober- und Unterbeton unter dem Lastfall "Fugenbewegung".

2 Vorversuche

Nach einer einschlägigen Literaturstudie wurden in Vorversuchen zunächst geeignete Carbonbewehrungen und darauf abgestimmte Betone für die textilbewehrte Oberbetonschicht (CRC-Schicht) ermittelt, die grundsätzlich eine Umsetzung des angedachten Prinzips erwarten lassen. Gleichzeitig muss der Beton selbstverständlich auch alle Anforderungen an einen Straßenbeton nach den TL Beton-StB 07 erfüllen. Um sowohl diese erfüllen zu können als auch die Einbettung der Carbonbewehrung und den Einbau in Schichtdicken von nur wenigen Zentimeter zu ermöglichen, wurde ein Straßenbeton mit einem Größtkorn von 8 mm (Waschbeton) gewählt. Gegenüber einem klassischen Waschbeton wurden geringfügige Modifizierungen vorgenommen. Um eine gute Durchdringung der Bewehrungslage mit Beton sicherzustellen und die Verarbeitung und insbesondere Verdichtung des Betons zu erleichtern, wurde der Beton mit einer sehr weichen Konsistenz (Konsistenzklasse F4) hergestellt. Wie nach TL Beton-StB 07 gefordert wurde ein Luftporengehalt von im Mittel mindestens 4,5 Vol.-% eingestellt.

Für die Bewehrung standen zunächst zwei mögliche Textilien zur Auswahl, die annähernd gleiche Verarbeitungseigenschaften zeigten. Aufgrund der Epoxidharztränkung war Textil A jedoch steifer als das mit Polystyrol getränkte Textil B. Für die hier herzustellenden Probekörper war dieser Unterschied beim Einbau der Bewehrung nicht relevant. Bei der Verarbeitung in situ hingegen kann sich eine höhere Steifigkeit positiv auf die Lagegenauigkeit des Textils im Beton auswirken.

3 Dehnverhalten des Carbonbetons und zugehörige Rissentwicklung

Um die notwendigen Kenntnisse zur Rissbildung und -entwicklung zu erhalten, wurden Zug- und Biegezugversuche an carbonbewehrten Probekörpern durchgeführt. Die carbonbewehrten Proben zeigten in den zentrischen Zugversuchen für beide Textilien ein grundsätzlich vergleichbares Rissbildungs- und Tragverhalten. Jedoch zeigten sich zwischen diesen in Rissanzahl und Rissbreiten doch deutliche Unterschiede. In den mit Textil A (EP-getränkt) bewehrten Proben bildeten sich mehr Risse mit geringeren Rissbreiten aus als in jenen mit Textil B (Polystyrol-getränkt). Da die Begrenzung der Rissbreiten im Fugenbereich eine der entscheidenden Anforderungen ist, wurde für die weiteren Untersuchungen das Textil A als Carbonbewehrung festgelegt.

In weiteren zentrischen Zugversuchen wurden das Rissbildungsverhalten von mit Textil A bewehrten Probekörpern bei Variation der Bewehrungslagen und der Dicken der Probekörper untersucht. Mit Zunahme der Bewehrungslagen von einer auf zwei und der Bewehrungskörperdicke von 50 auf 70 mm nahm neben den Rissbreiten auch die Rissanzahl zu. Insgesamt bildeten sich im 740 mm langen Prüfbereich bis zum Versuchsabbruch bei einer Gesamtverformung von bis zu 18 mm zwischen 8 und 13 Risse mit Breiten von im Mittel 0,58 bis 0,73 mm aus.

An carbonbewehrten Probekörpern zeigte sich im 4-Punkt-Biegezugversuch, dass die höchsten Biegespannungen in 50 mm dicken Probekörpern mit zwei Bewehrungslagen aufgenommen werden konnten. Die Rissanzahl nahm mit zunehmenden Bewehrungslagen und zunehmender Probekörperdicke ab. Das Versagen war in allen Fällen auf ein Reißen der Bewehrung zurückzuführen, teilweise zeigte sich auch eine Delamination zwischen Carbonrovings und dem Beton. Das Versagen kündigte sich durch starke Durchbiegungen und die damit verbundene Rissbildung an.

In weiteren zentrischen Zugversuchen wurde das Zugverhalten von CRC an zweilagig bewehrten Probekörpern unterschiedlicher Länge sowohl unter statischer als auch zyklischer Beanspruchung und dies auch bei verschiedenen Temperaturen untersucht. Erfasst wurden dabei wiederum die Rissentwicklung und das Resttragverhalten nach zyklischer Vorbelastung. Die untersuchten statischen Probekörper wiesen unabhängig von der Probekörperlänge ein gleichmäßig verteiltes und feines Rissbild auf. Weiterhin konnte im Bereich von -20 bis 60 °C kein Einfluss der Temperatur auf die Rissverteilung im Carbonbeton festgestellt werden. Die in den Zugversuchen ermittelten Spannung-Dehnungs-Linien wiesen einen für Carbonbeton typischen Verlauf auf. In den zyklischen Versuchen zeigte sich zu Beginn erwartungsgemäß eine überproportionale Abnahme der Steifigkeit und eine überproportionale Zunahme der Dehnung. Anschließend nehmen mit steigenden Lastzyklen beide Kennlinien einen linearen Verlauf an. Auffallend war, dass die Resttragfähigkeit der zyklisch vorbeanspruchten Proben größer war als die Bruchlast der statisch belasteten Proben.

4 Verbundverhalten zwischen Carbonbeton und gefugtem Unterbeton

Die Zug- und Biegezugversuche an Verbundkörpern unter statischer und zyklischer Belastung sowie Zugversuche am Carbonbeton bei unterschiedlichen Temperaturen stellten die Hauptversuche des Projekts dar. In den statischen Biegezugversuchen an Verbundkörpern wurde die Rissentwicklung in der Carbonbetonschicht im Verbund mit dem Unterbeton untersucht. In den zyklischen Biegezugversuchen an Verbundkörpern standen hingegen das Verbundverhalten zwischen Unter- und carbonbewehrtem Oberbeton sowie das Rissüberbrückungsvermögen der Carbonbetonschicht im Fokus. Um den Einfluss unterschiedlicher Umgebungstemperaturen auf dieses

Verhalten zu erfassen, wurden zudem Probekörper bei verschiedenen Temperaturen untersucht.

Die hier verwendeten Verbundbalken wurden im Unterbeton mit konventionellem Straßenbeton mit 22 mm Größtkorn hergestellt. In diesem wurde auch eine Fuge wie in situ integriert. Um einen hinreichenden Verbund zum carbonbewehrten Oberbeton hin zu ermöglichen, wurde die Oberfläche dieses Unterbetons rau (Waschbetonstruktur) ausgebildet. Darüber hinaus wurde der Einfluss einer Verbundtrennung beidseits der Fuge auf das Trag- und Rissbildungsverhalten untersucht. Diesbezüglich wurden die Breite der Verbundtrennung (0 mm, 150 mm und 300 mm beidseits der Fuge) sowie das Material zur Verbundtrennung (PE-Folie, Bitumenbeschichtung mit Alukaschierung) variiert. Des Weiteren wurden unterschiedliche Schichtdicken des carbonbewehrten Oberbetons (50 mm, 70 mm) und unterschiedliche Bewehrungslagen (1 Lage, 2 Lagen) einbezogen.

In den statischen 4-Punkt-Biegezugversuchen zeigte sich, dass durch die Verbundtrennung auf eine begrenzte Strecke beidseits der Fugen, sich die in der CRC-Schicht über den Fugen einstellenden Rissbreiten deutlich verkleinerten. Die Rissanzahl hingegen veränderte sich kaum (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Dabei wirkten sich Verbundtrennungen über größere Strecken kaum auf die Rissanzahl und nur geringfügig auf die Rissbreiten aus. Allerdings stellte sich dabei bei Verbundtrennungen > 150 mm beidseits der Fugen eine reduzierte Traglast ein. In allen Fällen traten maximale Rissbreiten von 0,3 mm auf. Die dabei erreichten Durchbiegungen konnten nicht messtechnisch erfasst werden, waren jedoch deutlich sichtbar. Kein merklicher Einfluss auf die Rissentwicklung konnte bei den verschiedenen Verbundtrennungsmaterialien festgestellt werden. Gleiches gilt für die variierten Schichtdicken der CRC-Schicht. Hingegen führte die Erhöhung der Carbonbewehrung von einer Lage auf zwei Lagen, zu feineren Rissen und zu einer erhöhten Tragfähigkeit. Das Reißen der Bewehrung stellte auch in all diesen Versuchen den maßgebenden Versagensmechanismus dar (Bild 3). Delaminationen zwischen Bewehrung und Matrix konnten lokal festgestellt werden, zu einem vollständigen Auszug der Bewehrung kam es in keinem Fall. Des Weiteren blieb bei diesen Versuchen die Verbundfuge außerhalb der Verbundtrennungsbereiche stets intakt.

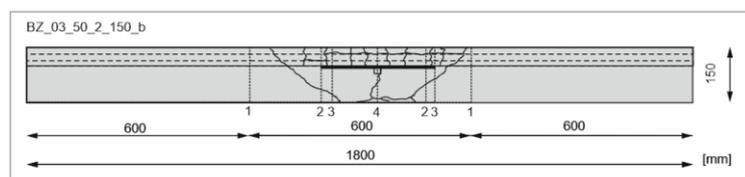


Bild 2: Beispiel Rissbild Biegezugversuche unter statischer Last, 1 – Auflagerlinie, 2- Verbundtrennung, 3 – Lasteinleitungslinie, 4 – Balkenmitte.



Bild 3: CRC-Schicht nach Versagen (Reißen der Carbonbewehrung)

Um die in situ kontinuierlich einwirkenden Verkehrslasten zu simulieren, wurden zyklischen Biegeversuche (4-Punkt) durchgeführt. Dabei war der Unterbeton in Balkenmitte durch die Einlage von 20 mm breiten XPS-Streifen mit einer Fuge ausgebildet. Letztere wurde mit zwei Straßenbaudübeln zusammengehalten, um den Aufbau einer Betonfahrbahndecke in situ zu simulieren. Entsprechend den in der Praxis potenziell auftretenden Temperaturgradienten und Verkehrslasten wurden diese Versuche bei einer Oberspannung $\sigma_o = 3,40 \text{ N/mm}^2$ und einer Unterspannung $\sigma_u = 2,2 \text{ N/mm}^2$ durchgeführt, was einem Ausnutzungsgrad des Carbonbetons von 61 % entsprach. Im Fokus standen dabei das Rissüberbrückungsvermögen der Carbonbetonschicht sowie das Verbundverhalten zwischen Unter- und Carbonbeton unter zyklischer Belastung. Nach 5 Millionen Lastzyklen zeigte sich, dass mit zunehmender Breite der Verbundtrennung die Rissanzahl anstieg, wobei die Rissbreite nahezu unverändert blieb. Es traten zwischen 1 und 3 Risse pro Balken auf, die zumeist innerhalb des Bereichs der Verbundtrennung von Unter- und Oberbeton lagen. Die Anzahl der Bewehrungslagen und die Schichtdicke der CRC-Schicht wirkten sich hingegen auf die Rissbreiten (0,1 – 0,3 mm), nicht aber auf die Rissanzahl aus. Weiterhin war festzustellen, dass eine Erhöhung der Dicke der CRC-Schicht von 50 mm auf 70 mm sich nur untergeordnet auf die Rissbreiten auswirkte. Parallel zu den visuellen Rissbeobachtungen wurden an den zyklisch belasteten Biegebalken die Verformungen im relevanten Bereich mit Dehnmessstreifen sowie Veränderungen in der Steifigkeit infolge Degradation über Ultraschalllaufzeitmessungen verfolgt. Mit Letzteren bestätigte sich, dass der für die Degradation maßgebliche relative dynamische E-Modul (RDEM)

auch im carbonbewehrten Oberbeton sich wie in herkömmlichen Straßenbetonen veränderte. Bei den Dehnmessungen in Balkenmitte mittels Dehnmessstreifen zeigte sich, dass die Risse bereits in den ersten 10 000 Belastungszyklen auftraten. Die Rissbreiten von maximal 0,3 mm konnten hier bestätigt werden. In den Bereichen außerhalb der Risse wurden Dehnungen beziehungsweise Stauchungen von maximal 680 $\mu\text{m/m}$ gemessen.

Im Anschluss an die zyklischen Belastungen wurden aus den so vorbelasteten Balkenmitten und den praktisch nicht belasteten Balkenrändern Bohrkerne für Scherversuche, Zugversuche zur Bewertung des verbleibenden Verbunds entnommen. An den Balken mit Verbundtrennung wurden die Proben unmittelbar neben dem Verbundtrennungsbereich entnommen. In den Haftschersversuchen wurden Verbundfuge bei geringer Verbundtrennungsbreite etwas niedrigere Rest-Haftscherfestigkeiten als bei größerer Verbundtrennung festgestellt. Hingegen konnte bei den Haftzugversuchen auch nach 5 Mio. Lastwechseln kein Einfluss der zyklischen Belastung auf den Verbund zwischen Unter- und Oberbeton festgestellt werden. In den Haftzugversuchen trat das Versagen stets im Unterbeton auf. Auch wenn die Verbundfuge durch die zyklische Vorbelastung eine geringe Schädigung erfahren haben sollte, wie sich dies vereinzelt in den Haftschersversuchen andeutete, kann davon ausgegangen werden, dass sich unter den hier untersuchten Randbedingungen auch nach hohen Lastwechseln keine weitere Delamination einstellt.

5 Ergänzende Studien zum Eindringverhalten gegenüber flüssigen Medien

An den zyklisch vorbelasteten Proben wurde das Eindringverhalten des carbonbewehrten Betons gegenüber Wasser und Tausalzlösungen untersucht. Dazu wurde die Wasseraufnahme (drucklos) in zyklisch vorbelasteten als auch unbelasteten Balkenbereichen über Karsten-Röhrchen bestimmt. Zusätzlich wurden aus beiden Bereichen Bohrkerne ($\varnothing 150 \text{ mm}$) entnommen, an denen das Wassereindringverhalten unter Druck ermittelt wurde. Insgesamt zeigte sich, dass durch die Degradation im Mikrogefüge des Betons infolge der zyklischen Vorbeanspruchung zwischen 9 und 31 % mehr an Wasser aufgenommen wurde als im unbelasteten Beton. Bei den dünneren CRC-Schichtdicken (50 mm) war dieser Effekt erwartungsgemäß stärker ausgeprägt als bei dickeren Schichten (70 mm).

6 Resümee

Wenngleich die hier durchgeführten Untersuchungen bestenfalls als erste orientierende Studien zur Anwendung von carbonbewehrtem Oberbeton zur Überbrückung von Fugen in Betonfahrbahndecken betrachtet werden können, was vom Ansatz her auch so konzipiert war, lassen die Ergebnisse dennoch die grundsätzliche Machbarkeit dieser Alternative erkennen. Durch eine Carbonbewehrung (ein- bis zweilagig) in etwa 50 bis 70 mm Oberbetonschichten können bei entsprechender

Verbundunterbrechung beidseits der Fuge im Unterbeton die Fugenbewegung in der CRC-Schicht so in mehrere Risse verteilt werden, deren Breiten zwischen etwa 0,1 bis 0,3 mm liegen, also in einer Größenordnung wie bei bewehrten Betonfahrbahnplatten. Ebenso konnte gezeigt werden, dass durch zyklische Beanspruchungen eine Delamination des Oberbetons vom Unterbeton über die gezielte Verbundunterbrechung hinaus nicht grundsätzlich zu befürchten ist. Obwohl die hier gewonnenen Erkenntnisse als positiv zu werten sind, sind bis zur Umsetzung dieses Konzepts in die Praxis weitergehende Untersuchungen unabdingbar.