

Untersuchungen zur Biegezugfestigkeit von hochfestem Straßenbeton, Teile I und II

FA 8.141

Forschungsstelle: Technische Universität München, Lehrstuhl für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung (Prof. Dr.-Ing. P. Schießl)

Bearbeiter: Beckhaus, K.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bonn

Abschluss: Oktober 2002

1. Aufgabenstellung

Betonfahrbahndecken in Deutschland sind i. d. R. unbewehrt und werden nach ihrer Herstellung durch das Schneiden von Quer- und Längsscheinfugen in Platten unterteilt, die als biegebeanspruchte Bauteile bemessen werden. Entsprechend ist die Biegezugfestigkeit die maßgebende Widerstandsgröße des Betons. Hochleistungs-Straßenbeton (HIStB) mit einem kennzeichnenden w/z-Wert deutlich unter 0,40 lässt eine deutlich erhöhte Biegezugfestigkeit erwarten. Gleichzeitig werden aber auch andere betontechnologische Eigenschaften beeinflusst, die sich auf den Spannungszustand in einer Betonfahrbahndecke auswirken können. So würde ein erhöhter E-Modul des HIStB ggf. eine höhere Biegezugspannung bewirken und damit den "Gewinn" an Tragfähigkeit wieder reduzieren.

Die infolge thermischer und hygrischer Einwirkungen entstehenden Temperatur- und/oder Feuchteverteilungen über die Querschnittsdicke bewirken mit ihrem linearen Anteil eine Biegeverformung der Betonfahrbahnplatte. Aus der Behinderung dieser Biegeverformung, z. B. durch das Eigengewicht, resultiert eine Biegezugspannung im Beton, von der folglich auch die maximal zulässige Verkehrslastspannung abhängt.

Im erhärteten Beton ist die entstehende Zwangsspannung abhängig von der entsprechenden Temperatur- und Feuchteänderung im Beton und vom E-Modul des Betons, ggf. vom Relaxationsvermögen des Betons.

Die Zwangsspannungsentwicklung in den ersten Stunden und Tagen nach der Herstellung einer Betonfahrbahndecke hängt von mehreren Einflüssen ab – zum einen von den Umgebungsbedingungen unter Berücksichtigung der Hydrationswärmeentwicklung, zum anderen von der zeitlichen Entwicklung des E-Moduls (für den Spannungsaufbau) und des zeitabhängigen viskosen Verformungsverhaltens (Relaxation) des Betons.

Bis zum Schneiden der Scheinfugen besteht die besondere Gefahr wilder Risse infolge einer zentrischen Zugbeanspruchung unter Zwang, wenn sich etwa in einer Betondecke bei einer Erwärmung in den ersten Stunden nur geringe Druckspannungen aufbauen, bei der nachfolgenden Abkühlung (mit inzwischen höherem E-Modul und geringerer Relaxation) aber relativ hohe Zugspannungen – bei gleichzeitig noch geringer Zugfestigkeit. Ein Beton mit einer geringen möglichen Abkühlung bis zum Riss besitzt somit eine hohe Reißneigung.

Die Temperatur- und Zwangsspannungsentwicklung im jungen Alter hat auch Bedeutung für die Biegebeanspruchung einer Betonfahrbahndecke. So kann z. B. eine an der Oberfläche bei höherer Temperatur (als unten) erhärtete Betondecke

bereits bei einem späteren Temperaturengleich ein Abheben der Plattenenden (Aufschüsseln) bzw. eine entsprechende Biegezugspannung aufweisen.

Neben grundlegenden Fragen wie nach der Einbaufähigkeit mit dem Gleitschalungsfertiger und nach der Reißneigung im jungen Alter war v. a. zu klären, inwiefern veränderte Verformungseigenschaften eines HIStB die Biegebeanspruchungen in der Fahrbahnplatte erhöhen können, d. h. die Tragfähigkeit nicht in der gleichen Weise wie die Biegezugfestigkeit erhöht wird.

Beim Neubau einer Betonfahrbahndecke üblicher Deckendicke (26 bis 30 cm) würde eine effektiv erhöhte Tragfähigkeit höhere Verkehrslasten ermöglichen, beim streifenweisen Ersatz einzelner geschädigter Fahrstreifen die Beibehaltung der Deckendicke, ggf. von nur 20 bis 22 cm.

Neben Laboruntersuchungen an HIStB wurden im Rahmen einer solchen Instandsetzungsmaßnahme baustellenbegleitende Untersuchungen durchgeführt.

2. Untersuchungsmethodik und -ergebnisse

Die untersuchten HIStB hatten w/z-Werte von 0,30 bis 0,36 und Bindemittelgehalte von 400 bis 450 kg/m³. Teilweise wurden 4 % des Zements CEM I 32,5 R durch Silikastaub und in einem Fall zusätzlich 20 % durch Flugasche ausgetauscht. Der Sand war feinstteilarmen Natursand und der Grobzuschlag bestand zu 100 % aus Hartsteinsplitt mit einem Größtkorn von 16 oder 22 mm.

2.1 E-Modul

Der E-Modul von HIStB ist i. d. R. mit etwa 40 000 N/mm² deutlich höher anzunehmen als beim normalfesten Straßenbeton mit etwa 35 000 N/mm². Der zu erwartende E-Modul ist aber maßgeblich vom E-Modul des Zuschlags abhängig. Durch die Verwendung sehr steifer Zuschläge dürften um bis zu 5 000 N/mm² höhere Werte erreicht werden.

2.2 Zentrische Beanspruchung im jungen Alter

Grundsätzlich ist die Reißneigung von HIStB deutlich höher als die von normalfestem Straßenbeton. Die hierfür verantwortlichen hohen Zwangsspannungen sind zum großen Teil auf den im Vergleich zum normalfesten Straßenbeton höheren E-Modul, die gleichzeitig geringere Relaxation und auf das (zusätzliche) autogene Schwinden des HIStB zurückzuführen. Zum kleinen Teil wirkt sich auch die etwas schnellere Entwicklung der Hydrationswärme ungünstig aus; bei Deckendicken bis 30 cm dürfte aber die äußere Temperatureinwirkung dominieren.

Der HIStB mit einem sehr geringen w/z-Wert von 0,30 und mit Silikastaub, der von den untersuchten Betonen hinsichtlich Reißneigung die ungünstigste Zusammensetzung haben dürfte, zeigte bei einem ungünstigen Temperaturverlauf mit hoher Temperatur im sehr jungen Alter (geringe Druckspannung) und nachfolgender Abkühlung um etwa 15 Kelvin zwar erwartungsgemäß eine vergleichsweise hohe Zugspannung (1,3 N/mm²), riss aber erst nach Beendigung der Temperaturzyklen (nach 3 Tagen) durch eine weitere Abkühlung. Die Reißneigung des HIStB konnte durch den Austausch von Zement gegen Flugasche deutlich verbessert werden.

2.3 Biegezugfestigkeit

Die Biegezugfestigkeit von HIStB im Alter von 28 Tagen nach Lagerung unter Wasser war im Vergleich zum normalfesten Referenzbeton mit rd. 6 N/mm^2 ($w/z = 0,45$) um 2,2 bis $3,6 \text{ N/mm}^2$ höher. Der maßgebliche Einfluss war hier der w/z -Wert, d. h. die höchsten Werte wurden mit dem w/b -Wert von 0,30 erreicht. Eine weitere Erhöhung ist durch einen teilweisen Ersatz des Zements durch Silikastaub zu erreichen, dessen Gehalt für eine ausreichende Verarbeitbarkeit aber nach oben zu begrenzen ist (auf ca. 4 % vom Bindemittelgehalt).

Nach einem stetigen Austrocknen an der Biegezugseite (ab einem Alter von 3 Tagen bei 65 % r. F.) haben sich unabhängig vom Referenzwert (Alter = 28 d, Lagerung unter Wasser) um mehr als $3,0 \text{ N/mm}^2$ geringere Biegezugfestigkeiten ergeben. Bei einer Lagerung im Freien ab der Herstellung und ohne Nachbehandlung ergab sich nur eine um $0,7 \text{ N/mm}^2$ geringere Biegezugfestigkeit (Ref.: $9,6 \text{ N/mm}^2$). Die einwirkende Feuchte der Außenluft war dabei im Mittel zwar vergleichbar (65 % r. F.), aber wechselnd zwischen 40 % r. F. und 95 % r. F. (bei Regen).

2.4 Lastunabhängige Biegeverformung

Beim HIStB ist infolge einseitigen Austrocknens i. d. R. mit einer deutlich geringeren Biegeverformung zu rechnen als beim normalfesten Straßenbeton. Am 15 cm hohen Balken, der ab dem Alter von 3 Tagen bei 65 % r. F. austrocknen konnte, ergaben sich nur halb so große Biegeverformungen.

Ein sehr frühes Austrocknen an der Oberfläche (nach einem Tag) hat aber sogar etwas höhere Biegeverformungen des HIStB zur Folge gehabt. Hierfür dürften zwei Effekte verantwortlich gewesen sein: zum einen konnte sich offenbar auch beim HIStB (trotz des geringen w/b -Wertes von nur 0,34) ein relevanter Feuchtegradient ausbilden, solange ein Teil des Wassers noch nicht durch die Hydratation gebunden war; zum anderen dürfte der HIStB (mit seiner schnelleren Festigkeitsentwicklung) im jungen Alter eine höhere Umsetzung von Feuchteänderungen in elastische Formänderungen erreicht haben.

Wegen der stark zeitabhängigen Austrocknung ist gleichzeitig mit der auftretenden Biegeverformung mit einem Kriechen bzw. mit Relaxation in der Betonfahrbahnplatte zu rechnen, d. h. mit deutlich kleineren Verformungen insbesondere bei einem jungen "Belastungsalter". Gleichzeitig ist zu berücksichtigen, dass die Feuchteänderung auf einen Randbereich von wenigen Zentimetern begrenzt ist, und dass deshalb die Biegeverformung infolge einseitigen Austrocknens umso geringer wird, je dicker die Fahrbahnplatte ist.

Da die hygrischen Einwirkungen (in Deutschland) kaum über längere Zeiträume konstant sind und zudem nur langsam zu linearen Anteilen des Feuchtegradienten in der Betondecke führen, dürfte es hinsichtlich der Biegebeanspruchung einer Betonfahrbahnplatte im Allgemeinen (außer im jungen Alter) ausreichen, den wirksamen Temperaturgradienten zu betrachten, der den aktuellen Temperaturgradienten und einen ggf. während der Erhärtung eingprägten Temperaturgradienten berücksichtigt.

Temperaturänderungen der Oberfläche der Betonfahrbahnplatte führen vergleichsweise schnell zu einer linearen Temperaturverteilung über die Deckendicke und damit zu entsprechenden Biegeverformungen. Durch eine sehr schnelle Abkühlung infolge eines Gewitterregens auf die warme und trockene Oberfläche wurden Biegeverformungen gemessen, für die ein wirksamer Temperaturgradient von fast 15 K über die Querschnittshöhe von hier 15 cm erforderlich war. Bei gleicher

effektiver Abkühlung an der Oberfläche ergaben sich (rechnerisch) auch für dickere Decken lineare Temperaturgradienten von 15 K bezogen auf die Querschnittsdicke, nur zeitverzögert bei größeren Dicken.

Der bei einem positiven Temperaturgradienten (oben warm) erhärtete Betonbalken zeigte nach mehreren Tagen bei einer aktuell konstanten Temperatur im Querschnitt ein Aufschüßeln entsprechend einem "wirksamen" Temperaturgradienten von 7 K über die Höhe von 15 cm.

2.5 Biegebeanspruchung (rechnerisch)

Nach theoretischen Überlegungen muss bei einer hohen lastabhängigen Biegebeanspruchung bei der Verdrehung der Plattenenden in der Scheinfuge eine Behinderung durch den Kontakt der Platten entstehen. Bei der untersuchten linearen Temperaturänderung von 15 Kelvin über die Deckendicke verkrümmt sich die Platte, d. h. die Plattenunterseite dehnt sich effektiv aus, die Oberseite verkürzt sich um den gleichen Betrag. Die entsprechende horizontale Verschiebung am unteren Plattenende (etwa 0,1 mm in der Fuge) aktiviert eine exzentrische Druckkraft, die eine zusätzliche Biegebeanspruchung erzeugt. Die Dübel in Fahrbahnlängsrichtung haben dabei nach überschlägiger Abschätzung keine maßgebende Momentenwirkung und sind im verwendeten zweidimensionalen System nicht integriert. Die Anker in Querrichtung dagegen sind – nach dem Reißen der Fugen – für eine relevante Momentenübertragung in der Längsscheinfuge erforderlich.

2.6 Betonfahrbahnplatte in Längsrichtung

Im Vergleich zu einem Balken, dessen Ende bei einer Biegebeanspruchung frei drehbar ist, erfährt ein Balken mit Zwang infolge einer exzentrischen Druckkraft in der Scheinfuge eine umso höhere Biegezugspannung, je höher die Verformung der ungekoppelten Platte wäre, d. h. je höher die Wärmedehnzahl (höhere Temperaturverformungen) und je höher der E-Modul ist (geringere Rückverformung aus Eigengewicht).

Wird gleichzeitig angenommen, dass beim (ersten) Aufreißen der Scheinfuge der Beton ein Nachbruchverhalten aufweist, d. h. der Beton im Riss Zugspannungen übertragen kann, haben sich in den Berechnungen um mehr als doppelt so hohe Biegezugspannungen ergeben wie bei Einzelbalken ohne Kopplung – maximal sogar Werte entsprechend dem vollen Biegezug. Bei einer gleichzeitig mit dem linearen Temperaturgradienten wirksamen mittleren Abkühlung (Verkürzung) des Balkens ergibt sich jeweils eine geringere maximale Biegezugspannung (bei einer gleichzeitig deutlich höheren Biegeverformung). Wie eine Einzelplatte ohne Kopplung verhält sich das System erst bei einer mittleren Abkühlung von etwa 4 K entsprechend einer Verkürzung der Platte um 0,2 mm.

Bei gleichzeitiger Längsvorspannung durch überbrückte Fugen infolge einer mittleren Temperaturerhöhung im Balken von ebenfalls 2 K war die berechnete Biegezugspannung um den gleichen Betrag kleiner als bei der mittleren Abkühlung. Je höher aber die (zentrische) Vorspannung, desto höher sind die Schubspannungen in Längsrichtung am Schnittgrund.

2.7 Betonfahrbahnplatte in Querrichtung

Die durch die Verankerung erzwungene Kopplung führt bei einem linearen wirksamen Temperaturgradienten zu einer unsymmetrischen Verformungsfigur, d. h. beim Abheben der Plattenenden zu jeweils höheren Kraglängen. Demnach ergaben sich in den drei miteinander verankerten Balken des untersuchten Systems jeweils höhere maximale Biegezugspannungen als für die (symmetrische) Einzelplatte berechnet. Trotz einer geringeren Breite war die Biegezugspannung

im (mittleren) Hauptfahrstreifen immer höher als im äußeren Überholfahrstreifen.

Insbesondere, wenn die Längsscheinfuge zwischen dem 1. Fahrstreifen und dem Standstreifen noch nicht gerissen ist (Nachbruchverhalten), hat sich rechnerisch eine um rd. 50 % höhere Biegezugspannung ergeben als bei einer durchgerissenen Fuge, bei der sich ebenfalls eine um etwa 50 % höhere Biegezugspannung gezeigt hatte als im ungekoppelten System.

3. Folgerung für Fahrbahndecken aus Hochleistungs-Straßenbeton

HIStB weist im Vergleich zu normalfestem Straßenbeton eine deutlich höhere Biegezugfestigkeit auf. Gleichzeitig muss bei einem gleich groß angenommenen wirksamen Temperaturgradienten mit einer geringfügig höheren Biegezugspannung gerechnet werden, die zum Teil in dem höheren E-Modul des HIStB begründet ist und in geringem Maß in der bei hochfesten Betonen etwas höheren Wärmedehnzahl des Zementsteins.

Als maßgebend für die Größe der Biegebeanspruchung haben sich aber in den Untersuchungen herausgestellt:

- die Größe der lastunabhängigen Biegeverformung infolge hygrischer und thermischer Einwirkungen und in diesem Zusammenhang
 - v. a. der Beginn eines möglichen Austrocknens und die Austrocknungsbedingungen, ggf. auch ein zusätzliches Quellen an der Unterseite,
 - die Überlagerung des aktuellen und des ggf. während der Erhärtung eingepprägten Temperaturgradienten,
- die systembedingte Behinderung einer Biegeverformung und in diesem Zusammenhang
 - die Einbautemperatur wegen einer möglichen Druckvorspannung bzw. eines Öffnens der Fugen,
 - die Deckendicke v. a. wegen des höheren Widerstandsmoments dickerer Decken,
 - die Wärmedehnzahl des Zuschlags als dominierende Größe für die Wärmedehnzahl des Betons und damit der effektiven Biegeverformung.

3.1 Hygrische Einwirkungen

In den vorliegenden Untersuchungen waren ein Kriechen oder eine Relaxation nicht möglich – ausgenommen für den nichtlinearen Anteil der resultierenden Formänderungen. Da aber auch der HIStB im jungen Alter noch Formänderungen plastisch abbauen kann, muss damit gerechnet werden, dass sich ein nicht zu vermeidendes (maßvolles) Austrocknen im oberen Randbereich nicht vollständig in Verformungen umsetzt. Die Biegebeanspruchung bzw. auch die Eigenspannung (Zug außen) im erhärteten Zustand der Fahrbahnplatte sind ggf. sogar geringer als bei einem (ersten) Austrocknen im höheren Alter.

3.2 Thermische Einwirkungen

Bei niedrigen Temperaturen hergestellte Betonfahrbahnen erfahren im Sommer kaum Biegezugspannungen infolge von wirksamen Temperaturgradienten, da der Querschnitt überbrückt ist. Bei einer sehr großen wirksamen Erwärmung ist die größte Zugspannung als Schubspannung in Längsrichtung zu erwarten. Direkt unterhalb des Fugenschnitts entstehen lokal sehr große Druckspannungen, insbesondere bei einem zusätzlichen Aufwölben. Als Folge entwickeln sich an der Grenze zwischen dieser belasteten Schicht und der oberen unbe-

lasteten Schicht Schubspannungen, mit ihrem Maximum unmittelbar neben dem Fugenschnitt. Da die größten Temperaturgradienten infolge Abkühlung oder Erwärmung von oben in den Sommermonaten zu erwarten sind, ist hier die mittlere wirksame Temperaturdifferenz bezogen auf die mittlere Nullspannungstemperatur von Bedeutung.

Um eine hohe Biegebeanspruchung bereits im jungen Alter – bei noch geringer Zugfestigkeit des Betons – gering zu halten, ist grundsätzlich das zeitgleiche Austrocknen und Abkühlen der Oberfläche weitgehend zu vermeiden, insbesondere wenn die Betonfahrbahndecke bei sehr hoher Außentemperatur erhärtet ist (oben warm). Neben der Nachbehandlung kommt deshalb auch dem Schutz des jungen Betons (vor einer ungünstigen Temperaturverteilung) eine große Bedeutung zu, hier – v. a. wegen des vergleichsweise geringen Relaxationsvermögen – noch mehr für den HIStB als für den normalfesten Straßenbeton.

Da beim HIStB auf Grund seiner schnelleren Festigkeitsentwicklung die Scheinfugen bereits relativ früh geschnitten werden können, gleichzeitig auch die Zugfestigkeit in diesem Alter relativ hoch ist, kann der HIStB hinsichtlich der Gefahr wilder Risse beherrscht werden. Baubegleitend könnte die Aufzeichnung der Temperaturentwicklung im HIStB Planungssicherheit für das rechtzeitige Fugenschneiden geben, wobei die Kenntnis der Reißneigung des eingesetzten Betons vorteilhaft wäre.

4. Ausblick für den Einsatz von Hochleistungs-Straßenbeton

Durch den Einsatz von HIStB kann eine deutlich höhere Tragfähigkeit und eine höhere Oberflächendauerhaftigkeit als mit normalfestem Straßenbeton erreicht werden. Gleichzeitig entstehen aber auf Grund des erforderlichen höheren Bindemittelgehalts von rd. 50 kg/m³ und ggf. eines Zusatzes von Silikastaub höhere Materialkosten und die veränderten Frischbetoneigenschaften infolge des geringeren w/z-Wertes unter 0,40 und der erforderlichen Fließmittelzugabe führen zu einem höheren Aufwand bei der Bauausführung.

Beim Neubau dürfte der Einsatz wegen der höheren Herstellungskosten zunächst auf Einzelfälle beschränkt bleiben, wobei das ansteigende Verkehrsaufkommen und ggf. höhere Achslasten in Zukunft höhere Tragfähigkeiten der Fahrbahndecken aus Beton erforderlich machen werden. Für den streifenweisen Ersatz unter Beibehaltung der Deckendicke dürfte der Einsatz von HIStB aber eine wirtschaftliche Alternative zu den Bauweisen mit Erhöhung der Deckendicke oder mit kleineren Platten und jeweils zusätzlichen Maßnahmen sein.

Soll bei einer Straßenbaumaßnahme die Tragfähigkeit aus wirtschaftlichen Gründen mit normalfestem Straßenbeton und entsprechend hoher Deckendicke erreicht, gleichzeitig aber eine besonders hohe Texturbeständigkeit angestrebt werden, z. B. aus Gründen der Lärmemission, bietet sich die zweischichtige Bauweise mit einer dünnen Oberbetonschicht aus HIStB an.

Hierbei ist jedoch auf ggf. sehr stark unterschiedliche technologische Eigenschaften der beiden eingesetzten Betone zu achten (Bimetalleffekt). Zu klären ist hier insbesondere, in welchem Maß das autogene Schwinden des Oberbetons durch eine Behinderung dieser Verkürzung durch den Unterbeton zu Zwangsspannungen führt und in welchem Maß betontechnologische Maßnahmen eine Reduzierung der entstehenden Zwangsspannungen ermöglichen. □