

Zusammenfassung der Promotionschrift

**Zum Tragverhalten von Polymermörtel-Klebverbindungen
für die Anwendung bei Straßenbrücken
in Holz-Beton-Verbundbauweise**

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

an der Fakultät Bauingenieurwesen
der
Bauhaus-Universität Weimar

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Martin Kästner
aus Weimar
- interner Doktorand -

Mentor:

Professor Dr.-Ing. Karl Rautenstrauch

Weimar, 18. März 2019

Problemstellung und Zielsetzung der Arbeit

1. Die Nutzung des nachwachsenden Rohstoffes Holz als Baumaterial ist eine naheliegende Möglichkeit Energiebedarf und Schadstoff-Emissionen im Bauwesen deutlich zu senken und große Mengen CO₂ langfristig zu speichern. Im Brückenbau besitzt der Baustoff bislang untergeordnete Bedeutung. Für Straßenbrücken mit Spannweiten bis ca. 30 m stellen Überbauten in Holz-Beton-Verbundbauweise (HBV) ökologisch vorteilhafte und ökonomisch konkurrenzfähige Alternativen zu üblichen Massivkonstruktionen dar.
2. Für HBV-Straßenbrücken sind Verbundfugenkonfigurationen (VFK) mit hohen Steifigkeiten im Gebrauchslastbereich, möglichst duktilem Versagensmechanismus und hohen Tragfähigkeiten erforderlich. Bei den meisten bislang eingesetzten Lösungen mit diskontinuierlichem Verbund wird jedoch die Längsschubfestigkeit des Holzes nicht optimal ausgenutzt.
3. Ziel der Arbeit war die Entwicklung und systematische Untersuchung neuartiger Verbundfugenkonfigurationen mit kontinuierlichem Verbund unter Einsatz toleranzausgleichender Klebverbindungen auf Basis mineralisch gefüllter Polymermörtel (PC). Im Vordergrund stand die Gewährleistung einer möglichst gleichmäßigen Schubübertragung, sodass insbesondere holzseitig lokale Spannungsspitzen vermieden werden.
4. Den Schwerpunkt der Arbeit bildeten experimentelle und numerische Untersuchungen zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit zweier weiterentwickelter Dübelleistenverbindungen mit PC-Verguss (VFK I und II) sowie der direkten PC-Klebverbindung von Beton und Holz (VFK III). Die Untersuchungen fokussierten auf das Trag- und Versagensverhalten unter Kurzzeitbeanspruchung.

Stand der Wissenschaft

5. Die Holz-Beton-Verbundbauweise besitzt eine ca. 100-jährige Entwicklungsgeschichte. Erste HBV-Straßenbrücken entstanden in den 1930er Jahren in den USA. In Europa wurden seit 1991 mindestens 51 HBV-Straßenbrücken errichtet – hiervon bislang sieben in Deutschland.
6. Die Schubübertragung erfolgt bei den meisten bisher entwickelten bzw. baupraktisch eingesetzten Verbundlösungen für HBV-Brücken diskontinuierlich und lokal an den Verbundelementen. Hieraus resultiert eine ungleichmäßige Schubbeanspruchung des Holzes, zum Teil verbunden mit hohen Spannungsspitzen. Die gegenüber Zug- und Druckfestigkeit bei faserparalleler Beanspruchung nur geringe Schubfestigkeit des Holzes kann so nicht optimal ausgenutzt werden.
7. Zur betonseitigen Verbundsicherung bei Stahl-Verbundbrücken kommen bevorzugt Kopfbolzen zum Einsatz. Die normativen Regelungen sind für das Verbundelement Dübelleiste anwendbar. Dessen Eignung für HBV-Brücken wurde in mehreren Forschungs- und Pilotprojekten nachgewiesen.
8. In der Literatur dokumentiert sind ferner Untersuchungen zu geklebten HBV-Konstruktionen, meist unter Verwendung ungefüllter oder schwach gefüllter Epoxidharzklebstoffe. Realisiert wurden stets relativ dünne Klebfugen mit weniger als 5 mm Dicke. Zur Sicherstellung einer vollflächigen Verklebung sowie des notwendigen Toleranzausgleiches, bei Verwendung von Betonfertigteilen für HBV-Brücken, erscheinen dünne Klebfugen ungeeignet.

9. Hinsichtlich des Toleranzausgleiches ist die Verwendung mineralisch gefüllter Klebmörtel auf Epoxidharzbasis vorteilhaft. Anwendungsbeispiele für derartige Klebmörtel sind Stahl- und CFK-Verstärkungen bei Betonbauteilen sowie geklebte Stahl-Verbundstraßenbrücken. In der Literatur sind hierzu umfangreiche wissenschaftliche Untersuchungen dokumentiert.

Eingesetzte Methoden

10. Die Verwendung von Polymermörteln für „dicke“ Klebfugen oder Vergussbereiche mit definierter Geometrie erfordert anwendungsspezifische Kenntnisse zum Materialverhalten. Die Grundlage für die Auswahl geeigneter PC-Rezepturen bildeten Baustoffprüfungen, u.a. zu relevanten Festkörpereigenschaften sowie zum Verarbeitungs- und Erhärtungsverhalten.
11. Die Material- resp. Klebverbunde PC/Holz, PC/Beton und PC/Stahl wurden in Druckschubversuchen unter Variation bestimmter Randbedingungen wie Oberflächenstrukturierung/-vorbehandlung oder Polymermörtelrezeptur untersucht. Für PC/Holz- und PC/Beton-Verbunde wurden zusätzlich Ermüdungsversuche durchgeführt.
12. Ergänzende FE-Simulationen dienten der detaillierten Analyse der Spannungsverteilungen, Spannungsinteraktionen und Versagensmechanismen für die genannten Materialverbunde resp. Versuchskonfigurationen.
13. Das holzseitige Trag- und Versagensverhalten wurde für die Verbundfugenkonfigurationen VFK I (Dübelleistenverbindung mit Vorholzersatz durch PC) und VFK II (im PC gebettete Dübelleisten) in Push-Out-Versuchen untersucht. Es erfolgte eine vergleichende Gegenüberstellung der Ergebnisse mit denen aus vorausgegangenen Untersuchungen zu konventionellen Dübelleistenverbindungen.
14. In Kurzzeitbiegeversuchen wurde das Gesamttragverhalten analysiert. Die Versuchsergebnisse und Erkenntnisse der Schub- und Scherversuche konnten hierbei unter realitätsnaher Beanspruchung an großformatigen HBV-Bauteilen überprüft werden.
15. Zur realitätsnahen numerischen Abbildung der Versagensmechanismen im Rahmen von FE-Simulationen wurden Modellierungsstrategien entwickelt und anhand von Literaturangaben sowie der eigenen Versuchsergebnisse kalibriert und validiert.

Wesentliche Ergebnisse

16. Für die untersuchten Verbundfugenkonfigurationen wurden geeignete Polymermörtel identifiziert und hinsichtlich ihres Materialverhaltens charakterisiert. Unterschiede, vor allem in Bezug auf Erhärtungsverhalten, Festigkeitsentwicklung, thermisches Ausdehnungsverhalten, Schwind- und Kriechneigung, sind bei der Bemessung sowie beim Herstellungsablauf zu berücksichtigen.
17. Bei VFK I und II sind Verbundsteifigkeit und -tragfähigkeit sowie Versagensmechanismus wesentlich von Anzahl und Durchmesser der Kopfbolzen abhängig und über diese Parameter modifizierbar. Voraussetzung für die Ausnutzung des plastischen Verformungspotentials der Kopfbolzen ist eine hohe holzseitige Beanspruchbarkeit.
18. Für VFK I wurden in den Push-Out-Versuchen ähnlich hohe Verbundsteifigkeiten erreicht wie bei Versuchen mit schmalen PC-Vergussstreifen zwischen Dübelleiste und Vorholz. Gleichermaßen wurde der holzseitige Anfangsschlupf eliminiert. VFK I erlaubt eine Reduzierung der Dübelleistenabstände und so eine Steigerung der Gesamtschubtragfähigkeit um bis zu 40%.

19. Bei reduzierten Dübelleistenabständen und zusätzlicher PC-Verklebung der Dübelleisten-grundflächen (VFK II) erfolgt eine kontinuierliche Schubübertragung mit holzseitig praktisch starrem Verbund. Anhand der Ergebnisse der Push-Out-Versuche kann ca. von einer Verdopp-lung der Gesamtschubtragfähigkeit ausgegangen werden.
20. Mittels zusätzlicher Schubverstärkungen sowie reduzierter Stahlplatten- und PC-Vergussfugen-dicken kann mit VFK II ein äußerst duktiler Versagensmechanismus durch die vollständige Ausnutzung des plastischen Verformungspotentials der Kopfbolzen sichergestellt werden. In den Biegeversuchen wurde so eine Steigerung der Gesamttragfähigkeit um maximal 166% erzielt.
21. Die Simulationsergebnisse für VFK II belegen, dass aufgrund der vorhandenen PC-Zwischen-schicht, im Vergleich zur konventionellen Dübelleistenverbindung, eine gleichmäßigere Schub-übertragung vorliegt. Bei gleichem Beanspruchungsniveau nehmen die Maximalwerte der Schubspannungen an der Holzoberfläche somit wesentlich geringere Werte an.
22. Durch die flächige PC-Verklebung (VFK III) wird ein kontinuierlicher, schubstarrer Verbund mit gleichmäßiger Schubbeanspruchung erreicht. Lokale Schubspannungsspitzen treten nicht auf. Gegenüber den Referenzträgern mit Dübelleistenverbindung und schmalem PC-Vergusstreifen wurden in den Biegeversuchen Tragfähigkeitssteigerungen um ca. 200% (mit zusätzlichen holz-seitigen Schubverstärkungen) bzw. 140% (ohne Schubverstärkungen) erzielt.
23. Aus relevanten Literaturquellen sowie den eigenen Versuchsergebnissen wurden grundsätz-liche Empfehlungen für die Ausführung von PC-Klebverbindungen abgeleitet. Für die mögli-chen Versagensfälle wurden Bemessungsvorschläge erarbeitet. Bei VFK I und II sollte die Bemessung für den Versagensfall Abscheren der Kopfbolzen (duktiler Versagensmechanismus) erfolgen.
24. Die für das Versagensverhalten relevanten Festigkeitswerte der Polymermörtel, insbesondere deren Schubfestigkeiten, übersteigen die der untersuchten Nadelholz- und Betongüten ca. um das drei- bis sechsfache. Ein kohäsives Versagen im PC ist somit ausgeschlossen. Ein adhäsives Versagen ist durch Einhaltung der Ausführungsempfehlungen auszuschließen.
25. Um bei VFK III eine optimale mechanische Verzahnung zwischen Beton und PC zu erzielen, zugleich die Adhäsionsfläche zu vergrößern und den Bruch in festere Bereiche des Betons zu verlagern, sollten für die Verklebung die groben Betonzuschlagstoffe freiliegen. Waschbeton-oberflächen, mit Auswaschtiefen von 2,0 und 2,5 mm, haben sich als geeignet erwiesen.
26. Durch die Anordnung zusätzlicher Dübelleisten bei VFK III kann ein spröder Schubbruch im Beton ausgeschlossen werden, sodass ein Schubversagen im Holz bemessungsrelevant wird. Holzseitige Schubverstärkungen tragen wesentlich zur Steigerung der Gesamttragfähigkeit bei.
27. Die Schubfestigkeit des in den Biegeversuchen zur Zugzonenverstärkung eingesetzten Furnier-schichtholzes ist bei liegenden Furnierlagen geringer als die Schubfestigkeit des Brettschicht-holzes. Dies erklärt die in den Versuchen häufig initial aufgetretene Schubrissbildung im Fur-nierschichtholz. Für Verstärkungslösungen ist in Trägerbereichen mit hoher Schubbeanspru-chung eine stehende Lage der Furniere anzustreben, da dann die Schubfestigkeit gegenüber Brettschichtholz größer ist.