

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-------------|
| Zusammenfassung | v |
| Abstract | viii |
| Formelzeichen und Abkürzungen | x |
| 1 Einleitung und Zielsetzung | 1 |
| 1.1 Einführung und Systemaufbau | 1 |
| 1.2 Ziel der Arbeit | 3 |
| 1.3 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit | 4 |
| 2 Holz-Beton-Verbundbauweise | 7 |
| 2.1 Allgemein | 7 |
| 2.2 Verbindungsmittel im Holz-Beton-Verbundbau | 8 |
| 2.3 Besonderheiten bei der Bemessung | 9 |
| 2.3.1 Kurzzeittragverhalten | 9 |
| 2.3.2 Langzeittragverhalten | 13 |
| 3 Einflussfaktoren auf die Tragfähigkeit des Verbundsystems | 19 |
| 3.1 Allgemeines | 19 |
| 3.2 Stabdübelverbindung | 19 |
| 3.3 Schubtragfähigkeit von Plattenelementen | 20 |
| 3.4 Längsschubtragfähigkeit der Verbunddübelleiste | 23 |
| 3.4.1 Einführung | 23 |
| 3.4.2 Stahlversagen | 23 |
| 3.4.3 Ausstanzen | 24 |
| 3.4.4 Abscheren | 27 |
| 3.4.5 Teilflächenpressung | 30 |
| 3.4.6 Spalten | 30 |
| 3.4.7 Verdübelungsbewehrung | 31 |
| 3.5 Zugtragfähigkeit des Verbundmittels | 33 |
| 3.6 Tragverhalten unter kombinierter Zug-Schub-Beanspruchung . . | 35 |
| 3.7 Tragverhalten eines Verbundträgers | 36 |
| 3.7.1 Einführung | 36 |
| 3.7.2 γ -Verfahren | 37 |
| 3.7.3 Modellierung als Stabwerk | 38 |
| 3.7.4 Differentialgleichung des nachgiebigen Verbundes . . . | 39 |
| 3.7.5 Segment-Lamellen-Verfahren | 40 |

| | |
|--|-----------|
| 4 Finite-Elemente-Methode | 43 |
| 4.1 Kontinuumsmechanik | 43 |
| 4.2 Einführung in die Methode der finiten Elemente | 44 |
| 4.3 Lösungsverfahren nichtlinearer Problemstellungen | 45 |
| 4.3.1 Nichtlinearitäten | 45 |
| 4.3.2 Iterationsverfahren | 47 |
| 4.4 Allgemeines zur Materialmodellierung | 49 |
| 4.4.1 Elastisches Materialverhalten | 49 |
| 4.4.2 Plastisches Materialverhalten | 51 |
| 4.5 Materialmodell des Stahls | 53 |
| 4.5.1 Elastische Stahlparameter | 53 |
| 4.5.2 Plastische Stahlparameter bzw. Materialmodelle | 53 |
| 4.6 Materialmodell des Betons | 56 |
| 4.6.1 Allgemeines | 56 |
| 4.6.2 Betonmodelle in ABAQUS | 57 |
| 4.6.3 CDP - Elastische Betonparameter | 58 |
| 4.6.4 CDP - Uniaxiales Zugtragverhalten | 59 |
| 4.6.5 CDP - Uniaxiales Drucktragverhalten | 62 |
| 4.6.6 CDP - Rissmodellierung | 65 |
| 4.6.7 CDP - Fließfläche bzw. multiaxiale Beanspruchung | 68 |
| 4.6.8 CDP - Plastisches Potential | 72 |
| 4.7 Materialmodell des Holzes | 73 |
| 4.8 Elementwahl und Diskretisierung | 75 |
| 4.9 Modellierung der äußeren Randbedingungen | 77 |
| 4.10 Interaktionsmodellierung | 77 |
| 4.10.1 Allgemein | 77 |
| 4.10.2 Interaktionseigenschaften | 79 |
| 5 Problemstellungen bei der FE-Simulation von hybriden Konstruktionen | 83 |
| 5.1 Allgemeines | 83 |
| 5.2 Tragverhalten von Kopfbolzendübeln | 83 |
| 5.3 Einflussfaktoren auf das Tragverhalten von Verbundmitteln | 85 |
| 5.3.1 Hydrostatische Spannungszustände | 85 |
| 5.3.2 Rissbildung im Beton | 86 |
| 5.3.3 Kraftübertragung durch Reibung | 86 |
| 5.4 FE-Modelle von hybriden Konstruktionen | 87 |
| 5.4.1 Einführung | 87 |
| 5.4.2 Kopfbolzendübel | 87 |
| 5.4.3 Verbunddübelleisten | 90 |
| 5.5 Empfehlungen zur FE-Modellierung von hybriden Konstruktionen | 95 |
| 6 Experimentelle Untersuchungen zum Tragverhalten des multifunktionalen Holz-Beton-Verbundsystems | 97 |
| 6.1 Allgemeines | 97 |
| 6.2 Werkstoffeigenschaften | 97 |
| 6.3 Experimentelle Untersuchungen - Längsschubbelastung | 100 |
| 6.3.1 Versuchsprogramm | 100 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 6.3.2 | Versuchskörperherstellung | 101 |
| 6.3.3 | Versuchsserie 1 - einteilige Ausgangsgeometrie | 102 |
| 6.3.3.1 | Vorbemessung der Versuchskörper | 102 |
| 6.3.3.2 | Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung | 104 |
| 6.3.3.3 | Versuchsergebnisse | 105 |
| 6.3.4 | Versuchsserie 2 - zweiteilige Geometrie | 108 |
| 6.3.4.1 | Vorbemessung der Versuchskörper | 108 |
| 6.3.4.2 | Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung | 109 |
| 6.3.4.3 | Versuchsergebnisse | 110 |
| 6.3.5 | Vergleich und Bewertung | 120 |
| 6.4 | Experimentelle Untersuchungen - Zugbelastung | 126 |
| 6.4.1 | Versuchsprogramm | 126 |
| 6.4.2 | Versuchskörperherstellung | 127 |
| 6.4.3 | Versuchsserie 1 - einteilige Ausgangsgeometrie | 127 |
| 6.4.3.1 | Vorbemessung der Versuchskörper | 127 |
| 6.4.3.2 | Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung | 129 |
| 6.4.3.3 | Versuchsergebnisse | 131 |
| 6.4.4 | Versuchsserie 2 - zweiteilige Geometrie | 133 |
| 6.4.4.1 | Vorbemessung der Versuchskörper | 133 |
| 6.4.4.2 | Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung | 134 |
| 6.4.4.3 | Versuchsergebnisse | 134 |
| 6.4.5 | Vergleich und Bewertung | 136 |
| 6.5 | Experimentelle Untersuchung des Verbundträgers | 144 |
| 6.5.1 | Vorbemessung der Versuchskörper | 144 |
| 6.5.2 | Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung | 149 |
| 6.5.3 | Versuchsergebnisse | 151 |
| 6.5.4 | Vergleich und Bewertung | 159 |
| 6.5.4.1 | Auswertung des Verformungsbildes des inneren Verbundblechs | 159 |
| 6.5.4.2 | Schnittgrößenberechnung der Einzelquerschnitte | 161 |
| 6.5.4.3 | Vergleich der Schubkraft-Schlupfbeziehung | 164 |
| 7 | Numerische Untersuchungen zum Tragverhalten des multi- funktionalen Holz-Beton-Verbundsystems | 169 |
| 7.1 | Einführung | 169 |
| 7.2 | FE-Modell - Längsschubbeanspruchung | 170 |
| 7.2.1 | Materialmodellierung | 170 |
| 7.2.2 | Strukturmodellierung | 174 |
| 7.2.3 | Vergleich der numerischen und experimentellen Ergeb- nisse | 175 |
| 7.3 | FE-Modell - Zugbeanspruchung | 182 |
| 7.3.1 | Allgemeines | 182 |
| 7.3.2 | Vergleich des CDP-Betonmodells und des Sprödbruchmo- dells | 182 |
| 7.3.3 | Strukturmodellierung | 183 |
| 7.3.4 | Vergleich der numerischen und experimentellen Ergeb- nisse | 185 |
| 7.4 | FE-Modell - kombinierte Schub- und Zugbeanspruchung | 187 |

| | | |
|------------------------------|--|------------|
| 7.4.1 | Modellierung | 187 |
| 7.4.2 | Vergleich der numerischen und experimentellen Ergebnisse | 189 |
| 8 | Ingenieurmodell zur Bemessung des multifunktionalen Holz-Beton-Verbundsystems | 191 |
| 8.1 | Modell zur Längsschubbeanspruchung | 191 |
| 8.1.1 | Versagensmechanismen unter Längsschub | 191 |
| 8.1.1.1 | Stabdübelverbindung | 191 |
| 8.1.1.2 | Schubbeulen | 192 |
| 8.1.1.3 | Stahlversagen der Verbunddübelleiste des inneren Verbundblechs | 193 |
| 8.1.1.4 | Abscheren des Mörtels | 194 |
| 8.1.1.5 | Lokale Mörtelpressung | 195 |
| 8.1.1.6 | Spaltriss in der inneren Mörtelfuge | 195 |
| 8.1.1.7 | Betondeckung des äußeren Verbundblechs | 198 |
| 8.1.1.8 | Gegenüberstellung der Versagensmechanismen | 199 |
| 8.1.2 | Überführung in ein Bemessungsmodell | 203 |
| 8.2 | Modell zur Zugbeanspruchung | 207 |
| 8.2.1 | Entwicklung des Ingenieurmodells | 207 |
| 8.2.2 | Überführung in ein Bemessungsmodell | 211 |
| 8.3 | Zusammenfassung des Bemessungsmodells zur Ermittlung der Schub- und Zugtragfähigkeit | 214 |
| 8.4 | Modell zur kombinierten Schub- und Zugbeanspruchung | 216 |
| 8.5 | Modell zur Bemessung des Verbundträgers | 217 |
| 8.5.1 | Vergleich der experimentellen Ergebnisse und der Ergebnisse des Stabwerkmodells | 217 |
| 8.5.2 | Vergleich der experimentellen Ergebnisse mit dem Segment-Lamellen-Verfahren | 219 |
| 8.5.3 | Entwicklung Stabwerkmodell - Verbundträger | 221 |
| 8.5.4 | Berücksichtigung des Langzeittragverhaltens | 222 |
| 9 | Zusammenfassung und Ausblick | 227 |
| Literatur | | 231 |
| Studentische Arbeiten | | 243 |
| Anhang | | |
| A | Verbundblechabmessungen | 245 |
| B | Versuche zum Längsschubtragverhalten | 247 |
| B.1 | Serie 1 - Ausgangsgeometrie | 247 |
| B.1.1 | Aufbau der Versuchskörper | 247 |
| B.1.2 | Materialkennwerte | 249 |
| B.1.3 | Versuchsergebnisse | 250 |
| B.2 | Serie 2 - optimierte Geometrie | 255 |
| B.2.1 | Aufbau der Versuchskörper | 255 |

| | |
|---|------------|
| B.2.2 Materialkennwerte | 258 |
| B.2.3 Versuchsergebnisse | 259 |
| C Versuche zum Zugtragverhalten | 283 |
| C.1 Serie 1 - Ausgangsgeometrie | 283 |
| C.1.1 Aufbau der Versuchskörper | 283 |
| C.1.2 Materialkennwerte | 285 |
| C.1.3 Versuchsergebnisse | 286 |
| C.2 Serie 2 - optimierte Geometrie | 294 |
| C.2.1 Aufbau der Versuchskörper | 294 |
| C.2.2 Materialkennwerte | 296 |
| C.2.3 Versuchsergebnisse | 298 |
| D Versuch zum Tragverhalten eines Verbundträgers | 323 |
| D.1 Aufbau des Versuchskörpers | 323 |
| D.2 Materialkennwerte | 326 |
| D.3 Versuchsergebnisse | 327 |
| E Dokumentation der FE-Modelle | 333 |
| E.1 FE-Modell Längsschub - Serie 1 | 333 |
| E.2 FE-Modell Längsschub - Serie 2 | 335 |
| E.3 FE-Modell Zug | 338 |
| E.4 FE-Modell Zug-Schub-Interaktion | 340 |
| Lebenslauf | 343 |