

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| LISTE DER VERWENDETEN BEZEICHNUNGEN | 9 |
| 1 EINLEITUNG | 13 |
| 1.1 Ausgangssituation | 13 |
| 1.2 Veranlassung | 13 |
| 1.3 Zielsetzung | 13 |
| 2 DERZEITIGER STAND DER NORMUNG | 14 |
| 2.1 Allgemeines | 14 |
| 2.2 DIN 488 (2009) | 14 |
| 2.3 DIN EN 10080 (2005) | 15 |
| 2.4 Model Code 2010 | 16 |
| 2.5 Fazit | 16 |
| 3 EXISTIERENDE VERBUNDVERSUCHSKÖRPER | 17 |
| 3.1 Überblick | 17 |
| 3.2 RILEM Beam Test RC5 | 18 |
| 3.2.1 Versuchsaufbau | 18 |
| 3.2.2 Bewertungskriterien | 20 |
| 3.3 RILEM Pull-Out Test RC6 | 20 |
| 3.3.1 Versuchsaufbau | 20 |
| 3.3.2 Bewertungskriterien | 21 |
| 3.4 Beam-End Test (ASTM A944-05)..... | 21 |
| 3.4.1 Versuchsaufbau | 21 |
| 3.5 Vor- und Nachteile der Versuchskörper | 22 |
| 3.5.1 Beurteilung des Beam Tests | 22 |
| 3.5.2 Beurteilung des Pull-Out Tests | 22 |
| 3.5.3 Beurteilung des Beam-End Tests | 23 |
| 3.5.4 Fazit | 23 |
| 4 STAND DER KENNTNISSE | 24 |
| 4.1 Verbundverhalten allgemein | 24 |
| 4.1.1 Bezogene Rippenfläche f_R | 25 |
| 4.2 Verbundmechanismus | 26 |
| 4.2.1 Phasen des Verbundes | 26 |
| 4.3 Mathematische Beschreibung des Verbundverhaltens | 27 |
| 4.3.1 Grundgesetz des Verbundes | 27 |
| 4.3.2 Mathematische Beschreibung der Verbundwirkung | 29 |
| 4.4 Mitwirkung des Betons zwischen den Rissen | 30 |
| 4.5 Einflussgrößen auf das Verbundverhalten | 32 |
| 4.5.1 Einfluss des Betons | 32 |
| 4.5.2 Einfluss des Bewehrungsstahls | 35 |
| 4.5.3 Einfluss veränderlicher Größen | 37 |
| 4.5.4 Zusammenfassung | 40 |
| 4.6 Einfluss von f_R auf das Tragverhalten im Bauteil | 40 |
| 4.6.1 Einfluss von f_R auf die Durchbiegung | 40 |
| 4.6.2 Einfluss von f_R auf die Rissbildung | 42 |
| 4.6.3 Einfluss von f_R auf die Rotationsfähigkeit | 48 |
| 4.6.4 Einfluss von f_R auf das Spalten und die Stoßtragfähigkeit | 60 |
| 4.6.5 Zusammenfassung | 73 |
| 4.7 Einfluss der Betonierlage | 74 |
| 4.8 Einfluss von f_R auf die Ergebnisse der Verbundversuche | 77 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 4.8.1 | <i>RILEM</i> Versuchskörper (<i>Beam Test</i> und <i>Pull-Out Test</i>)..... | 77 |
| 4.8.2 | <i>Beam-End Test</i> | 78 |
| 5 | FE-PROGRAMM MASA® | 80 |
| 5.1 | Allgemeines | 80 |
| 5.2 | Verbundmodell..... | 82 |
| 5.2.1 | <i>Implementierung</i> | 82 |
| 5.2.2 | <i>Verbund-Grundelement Parameter</i> | 83 |
| 5.2.3 | <i>Ansatzfunktionen zur Berücksichtigung veränderlicher Einflüsse</i> | 84 |
| 5.3 | Validierung des Modells | 86 |
| 5.3.1 | <i>Analyse einer einfeldrig gelagerten Platte</i> | 86 |
| 5.3.2 | <i>Analyse einer Platte mit Übergreifungsstoß</i> | 87 |
| 5.3.3 | <i>Analyse eines 4-Punkt-Biegebalkens</i> | 90 |
| 5.4 | Verbundspannungs-Schlupf-Kurven..... | 91 |
| 6 | FE-BERECHNUNGEN VON VERBUNDVERSUCHSKÖRPERN | 95 |
| 6.1 | Allgemeines | 95 |
| 6.2 | Übersicht der durchgeführten FE-Berechnungen..... | 95 |
| 6.2.1 | <i>FE-Modelle</i> | 96 |
| 6.3 | Ergebnisse der FE-Berechnungen | 97 |
| 6.3.1 | <i>Stabdurchmesser $d_s = 10$ mm</i> | 98 |
| 6.3.2 | <i>Stabdurchmesser $d_s = 16$ mm</i> | 100 |
| 6.3.3 | <i>Stabdurchmesser $d_s = 25$ mm</i> | 102 |
| 6.3.4 | <i>Einfluss der verbundfreien Vorlänge beim <i>Beam-End Test</i></i> | 104 |
| 6.3.5 | <i>Zusammenfassung</i> | 105 |
| 7 | VERSUCHE MIT VERBUNDVERSUCHSKÖRPERN | 106 |
| 7.1 | Allgemeines | 106 |
| 7.2 | Versuchsprogramm | 106 |
| 7.3 | Versuchskörper..... | 107 |
| 7.3.1 | <i>Geometrie</i> | 107 |
| 7.3.2 | <i>Betoneigenschaften</i> | 110 |
| 7.3.3 | <i>Eigenschaften des Betonstabstahls</i> | 110 |
| 7.4 | Versuchsaufbau und -durchführung | 111 |
| 7.4.1 | <i>Allgemeines</i> | 111 |
| 7.4.2 | <i>Beam Test RC5</i> | 111 |
| 7.4.3 | <i>Pull-Out Test RC6</i> | 113 |
| 7.4.4 | <i>Beam-End Test</i> | 114 |
| 7.5 | Versuchsergebnisse | 114 |
| 7.5.1 | <i>Allgemeines</i> | 114 |
| 7.5.2 | <i>Beam Test RC5</i> | 114 |
| 7.5.3 | <i>Pull-Out Test RC6</i> | 117 |
| 7.5.4 | <i>Beam-End Test</i> | 118 |
| 7.5.5 | <i>Vergleich der Ergebnisse aus den Verbundversuchen</i> | 119 |
| 7.6 | Vergleich mit Ergebnissen aus der Literatur | 123 |
| 7.6.1 | <i>Vergleich mit Versuchen nach Bony et al. (1973)</i> | 123 |
| 7.6.2 | <i>Verhältnis POT/BT nach Soretz (1972)</i> | 125 |
| 7.6.3 | <i>Vergleich mit den Bewertungskriterien</i> | 126 |
| 7.6.4 | <i>Einfluss der Betondruckfestigkeit und der Verbundlage</i> | 127 |
| 7.6.5 | <i>Zusammenfassung der Ergebnisse</i> | 134 |
| 8 | VERGLEICH EXPERIMENTELLER UND NUMERISCHER ERGEBNISSE | 135 |
| 8.1 | Allgemein | 135 |
| 8.2 | <i>Beam Test</i> | 135 |
| 8.3 | <i>Pull-Out Test</i> | 136 |
| 8.4 | <i>Beam-End Test</i> | 137 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 8.5 | Zusammenfassung | 138 |
| 9 | VORSCHLAG FÜR EIN VERBESSERTES VERBUNDMODELL | 139 |
| 9.1 | Neuer Ansatz | 139 |
| 9.1.1 | <i>Verbesserte Annahme für die Verbundgrundkurven</i> | <i>140</i> |
| 9.1.2 | <i>Grenzen des Verbundmodells</i> | <i>142</i> |
| 9.1.3 | <i>Validierung anhand der Verbundversuche</i> | <i>143</i> |
| 10 | FE-BERECHNUNGEN STAHLBETONBAUTEILE | 149 |
| 10.1 | Allgemeines..... | 149 |
| 10.2 | Übersicht Berechnungen | 149 |
| 10.3 | FE-Modelle | 151 |
| 10.3.1 | <i>Allgemeines zur Modellierung</i> | <i>151</i> |
| 10.3.2 | <i>Stabdurchmesser $d_s = 10$ mm</i> | <i>151</i> |
| 10.3.3 | <i>Stabdurchmesser $d_s = 16$ mm</i> | <i>153</i> |
| 10.3.4 | <i>Stabdurchmesser $d_s = 25$ mm</i> | <i>154</i> |
| 10.4 | Ergebnisse der Bauteilberechnungen..... | 155 |
| 10.4.1 | <i>Allgemeines.....</i> | <i>155</i> |
| 10.4.2 | <i>Einfluss des f_R-Werts auf die Durchbiegung</i> | <i>156</i> |
| 10.4.3 | <i>Einfluss des f_R-Werts auf die Rissbildung</i> | <i>156</i> |
| 10.4.4 | <i>Einfluss des f_R-Werts auf die Rotationsfähigkeit</i> | <i>161</i> |
| 10.4.5 | <i>Einfluss des f_R-Werts auf das Spaltvermögen</i> | <i>170</i> |
| 10.4.6 | <i>Schlechte Verbundlage</i> | <i>172</i> |
| 10.4.7 | <i>Zusammenfassung.....</i> | <i>175</i> |
| 11 | VERGLEICH DER NUMERISCHEN ERGEBNISSE | 176 |
| 11.1 | Allgemeines..... | 176 |
| 11.2 | Durchbiegung..... | 176 |
| 11.3 | Rissbildung..... | 176 |
| 11.3.1 | <i>Einfluss von f_R anhand der Verbundspannung $\tau_{0,15}$</i> | <i>176</i> |
| 11.3.2 | <i>Verifizierung der Ergebnisse</i> | <i>179</i> |
| 11.3.3 | <i>Vergleich der Einflüsse aus unterschiedlichen Ansätzen</i> | <i>181</i> |
| 11.4 | Rotationsfähigkeit | 183 |
| 11.5 | Spalten | 183 |
| 11.6 | Zusammenfassung | 184 |
| 12 | BEURTEILUNG UND EMPFEHLUNG | 185 |
| 12.1 | Allgemeines..... | 185 |
| 12.2 | Defizite der aktuellen Regelung | 185 |
| 12.3 | Beurteilung der Verbundversuchskörper | 187 |
| 12.3.1 | <i>Durchführbarkeit der Versuche in der Praxis</i> | <i>187</i> |
| 12.3.2 | <i>Einschätzung des Tragverhaltens im Bauteil</i> | <i>188</i> |
| 12.4 | Empfehlung | 190 |
| 12.4.1 | <i>Empfehlung für die aktuelle DIN EN 10080 (2005)</i> | <i>190</i> |
| 12.4.2 | <i>Generelle Anforderungen an die „neuen“ Versuchskörper</i> | <i>190</i> |
| 12.4.3 | <i>Empfohlene Versuchskörper</i> | <i>190</i> |
| 12.4.4 | <i>Empfehlung für den Beam-End Tests</i> | <i>192</i> |
| 13 | ZUSAMMENFASSUNG, AUSBLICK UND OFFENE FRAGEN | 197 |
| 13.1 | Allgemeines..... | 197 |
| 13.2 | Einfluss von f_R auf das Tragverhalten im Bauteil | 197 |
| 13.2.1 | <i>Durchbiegung</i> | <i>197</i> |
| 13.2.2 | <i>Rissbreiten.....</i> | <i>197</i> |
| 13.2.3 | <i>Rotationsfähigkeit</i> | <i>198</i> |
| 13.2.4 | <i>Spalten</i> | <i>198</i> |
| 13.2.5 | <i>Lage des Stabes beim Betonieren</i> | <i>199</i> |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 13.3 | Eignung der Prüfkörper..... | 199 |
| 13.4 | Zusammenfassende Empfehlung | 199 |
| 13.5 | Ausblick und offene Fragen | 200 |
| 14 | SUMMARY – ENGLISCHE ZUSAMMENFASSUNG | 201 |
| 14.1 | In general | 201 |
| 14.2 | Influence of f_R on the structural behaviour | 201 |
| 14.3 | Suitability of the test specimens..... | 203 |
| 14.4 | Concluding recommendation | 203 |
| 14.5 | Further investigations and open questions | 204 |
| 15 | LITERATUR | 205 |
| 16 | ANHANG..... | 209 |