

Inhalt

Inhalt _____ i

Zusammenfassung _____ vii

Abstract _____ viii

| | |
|---|----|
| 1 Einleitung und Zielsetzung | 1 |
| 1.1 Motivation | 1 |
| 1.2 Ziele der Arbeit | 4 |
| 1.3 Inhaltliche Gliederung der Arbeit | 5 |
| | |
| 2 Kleben im Bauwesen – Anwendungen und Forschung | 8 |
| 2.1 Allgemeines | 8 |
| 2.2 Brückenbau | 8 |
| 2.3 Bauwerkserstärkung mit aufgeklebten Stahl-, CFK- und GFK-Lamellen | 16 |
| 2.3.1 Anwendungen | 16 |
| 2.3.2 Klebstoffe | 18 |
| 2.3.3 Verbundansätze | 18 |
| 2.3.4 Nachweisführung | 19 |
| 2.4 Strukturelles Kleben im konstruktiven Glasbau | 20 |
| 2.4.1 Allgemeines | 20 |
| 2.4.2 Anwendungen | 20 |
| 2.4.3 Klebstoffe | 24 |
| 2.4.4 Nachweisführung | 26 |
| 2.5 Leichtbau | 27 |
| 2.6 Verbundbau | 29 |
| 2.7 Holzbau | 30 |
| 2.8 Zwischenfazit | 35 |
| | |
| 3 Aufbau, Eigenschaften und Auswahl von Klebstoffen | 36 |
| 3.1 Allgemeines und Klassifizierung | 36 |
| 3.2 Einteilung nach dem Aushärtungsmechanismus | 37 |
| 3.3 Aufbau der Klebstoffe | 38 |
| 3.3.1 Chemischer Aufbau der Monomere | 38 |
| 3.3.2 Reaktionsmechanismen der Polyreaktion | 39 |
| 3.3.3 Struktur der Polymere | 39 |
| 3.4 Zweikomponentenklebstoffe | 40 |
| 3.5 Klebstoffauswahl | 41 |
| 3.6 Epoxidharzklebstoffe | 42 |

| | |
|--|-----------|
| 3.6.1 Chemie der Epoxidharze | 42 |
| 3.6.2 Additionspolymerisation von Epoxidharzen | 44 |
| 3.6.3 Eigenschaften von Epoxidharzklebstoffen | 45 |
| 3.7 Polyurethanklebstoffe | 45 |
| 3.7.1 Chemie der Polyurethane | 45 |
| 3.7.2 Additionspolymerisation von Polyurethanen | 47 |
| 3.7.3 Eigenschaften von Polyurethanklebstoffen | 47 |
| 3.8 Eigenschaften des untersuchten Epoxidharzklebstoffes | 48 |
| 3.9 Eigenschaften des untersuchten Polyurethanklebstoffes | 49 |
| 4 Mechanische Werkstoffeigenschaften der untersuchten Klebstoffe | 50 |
| 4.1 Allgemeines und Grundversuche | 50 |
| 4.2 Einachsige Zugversuche nach DIN EN ISO 527-2 | 51 |
| 4.2.1 Allgemeines | 51 |
| 4.2.2 Versuchskörper nach DIN EN ISO 527-2 | 52 |
| 4.2.3 Durchführung der Zugversuche nach DIN EN ISO 527-2 | 52 |
| 4.2.4 Ergebnisse der Zugversuche nach DIN EN ISO 527-2 | 54 |
| 4.3 Zugscherversuche nach DIN EN 14869-2 | 57 |
| 4.3.1 Allgemeines | 57 |
| 4.3.2 Versuchskörper nach DIN EN 14869-2 | 58 |
| 4.3.3 Durchführung der Zugscherversuche nach DIN EN 14869-2 | 59 |
| 4.3.4 Ergebnisse der Zugscherversuche nach DIN EN 14869-2 | 61 |
| 4.3.5 Zusammenfassung der Ergebnisse | 66 |
| 4.4 Torsionsversuche nach DIN EN 14869-1 | 67 |
| 4.5 Zugversuche an stumpf verklebten Stahlzylindern | 68 |
| 4.5.1 Allgemeines | 68 |
| 4.5.2 Versuchskörper der stumpf verklebten Stahlzylinder | 69 |
| 4.5.3 Durchführung der Zugversuche an stumpf verklebten Stahlzylindern | 70 |
| 4.5.4 Ergebnisse der Zugversuche an stumpf verklebten Stahlzylindern | 71 |
| 4.6 Zugversuche an stumpf verklebten Stahlzylindern auf Beton | 73 |
| 4.6.1 Allgemeines | 73 |
| 4.6.2 Versuchskörper stumpf verklebter Stahlzylinder auf Beton | 73 |
| 4.6.3 Durchführung der Zugversuche an stumpf verklebten Stahlzylindern auf Beton | 77 |
| 4.6.4 Ergebnisse der Zugversuche stumpf verklebter Stahlzylinder auf Beton | 78 |
| 4.7 Schubversuche an ungeschlitzten Rohrproben | 82 |
| 4.7.1 Allgemeines | 82 |
| 4.7.2 Versuchskörper der Schubversuche an ungeschlitzten Rohrproben | 83 |
| 4.7.3 Durchführung der Schubversuche an ungeschlitzten Rohrproben | 87 |
| 4.7.4 Ergebnisse der Schubversuche an ungeschlitzten Rohrproben | 88 |
| 4.8 Schubversuche an geschlitzten Rohrproben | 95 |

| | |
|---|------------|
| 4.8.1 Allgemeines | 95 |
| 4.8.2 Versuchskörper der Schubversuche an geschlitzten Rohrproben | 95 |
| 4.8.3 Durchführung der Schubversuche an geschlitzten Rohrproben | 97 |
| 4.8.4 Ergebnisse der Schubversuche an geschlitzten Rohrproben | 98 |
| 4.9 Dynamisch-Mechanische Analyse (DMA) | 101 |
| | |
| 5 Großmaßstäbliche Bauteilversuche | 106 |
| 5.1 Allgemeines | 106 |
| 5.2 Materialeigenschaften der Verbundpartner | 107 |
| 5.2.1 Beton | 107 |
| 5.2.2 Stahl | 108 |
| 5.3 Push-out-Versuche | 110 |
| 5.3.1 Probekörper der Push-out-Versuche | 110 |
| 5.3.2 Oberflächenvorbehandlung der Versuchskörper | 110 |
| 5.3.2.1 Allgemeines | 110 |
| 5.3.2.2 Vorbehandlung der Betonoberflächen | 111 |
| 5.3.2.3 Vorbehandlung der Stahloberflächen | 112 |
| 5.3.2.4 Herstellung der Push-out-Körper | 113 |
| 5.3.2.5 Materialeigenschaften der Push-out-Körper am Versuchstag | 115 |
| 5.3.3 Durchführung der Push-out-Versuche | 115 |
| 5.3.4 Ergebnisse der Push-out-Versuche | 117 |
| 5.3.4.1 Betrachtung der Bruchbilder der Push-out-Körper | 117 |
| 5.3.4.2 Auswertungen der Messungen | 120 |
| 5.4 Verbundträgerversuche | 122 |
| 5.4.1 Probekörper der Verbundträgerversuche | 122 |
| 5.4.2 Oberflächenvorbehandlung der Versuchskörper | 123 |
| 5.4.2.1 Allgemeines | 123 |
| 5.4.2.2 Vorbehandlung der Betonoberflächen | 123 |
| 5.4.2.3 Vorbehandlung der Stahloberflächen | 124 |
| 5.4.2.4 Herstellung der Verbundträger | 125 |
| 5.4.2.5 Materialeigenschaften der Verbundträger am Versuchstag | 127 |
| 5.4.2.6 Momententrägfähigkeiten der Verbundträger am Versuchstag | 128 |
| 5.4.3 Durchführung der Verbundträgerversuche | 130 |
| 5.4.4 Ergebnisse der Verbundträgerversuche | 137 |
| 5.4.4.1 Betrachtung der Bruchbilder der Verbundträger | 137 |
| 5.4.4.2 Auswertungen der Messungen | 142 |
| | |
| 6 Mechanische Werkstoffeigenschaften von Normalbeton | 147 |
| 6.1 Allgemeines | 147 |
| 6.2 Materialverhalten und Werkstoffeigenschaften von Beton | 147 |
| 6.2.1 Allgemeines | 147 |

| | |
|--|------------|
| 6.2.2 Einaxiales Materialverhalten von Beton unter Zugbeanspruchung | 147 |
| 6.2.3 Einaxiales Materialverhalten von Beton unter Druckbeanspruchung | 152 |
| 6.2.4 Querdehnungsverhalten von Beton | 154 |
| 6.2.5 Zweiachsiales Materialverhalten von Beton | 155 |
| 6.2.6 Dreiachsiales Materialverhalten von Beton | 157 |
| | |
| 7 Mechanische Modelle zur Beschreibung des Klebstoffes und der Verbundpartner Stahl und Beton | 160 |
| 7.1 Allgemeines | 160 |
| 7.2 Elastische Modelle | 161 |
| 7.3 Elastoplastische Modelle | 162 |
| 7.3.1 Allgemeines | 162 |
| 7.3.2 Fließtheorie (inkrementelle Plastizitätstheorie) | 163 |
| 7.4 Modelle nach der Schädigungstheorie | 163 |
| 7.5 Konzepte zur Rissmodellierung | 164 |
| 7.5.1 Allgemeines | 164 |
| 7.5.2 Diskrete Rissmodellierung | 164 |
| 7.5.3 Verschmierte Rissmodellierung | 164 |
| 7.6 Grundlagen des ratenunabhängigen elasto-plastischen Materialverhaltens | 165 |
| 7.6.1 Allgemeines | 165 |
| 7.6.2 Anstrengungskriterien und Fließbedingungen | 167 |
| 7.6.3 Fließflächen | 168 |
| 7.6.4 Mechanische Grundlagen zur Formulierung von Anstrengungskriterien und Fließbedingungen | 168 |
| 7.6.5 Ver- und Entfestigungsgesetz | 173 |
| 7.6.6 Fließregel | 176 |
| 7.6.7 Thermodynamische Grundlagen | 178 |
| 7.7 Numerische Modelle und Anstrengungskriterien zur Beschreibung von Klebstoffen | 182 |
| 7.7.1 Allgemeines | 182 |
| 7.7.2 Allgemeine Formulierung der Spannungs-Dehnungs-Verläufe nach Schlimmer | 183 |
| 7.7.3 Drucker Prager und Extended Drucker Prager | 188 |
| 7.7.4 Ansatz nach Schlimmer | 190 |
| 7.7.5 Interfacemodell nach Alfano und Crisfield | 192 |
| 7.7.6 Ansatz zur Beschreibung der Delamination nach Ortiz und Pandolfi | 197 |
| 7.8 Numerische Modelle und Anstrengungskriterien zur Beschreibung von Beton | 200 |
| 7.8.1 Allgemeines | 200 |
| 7.8.2 Rankine Kriterium | 200 |

| | |
|---|------------|
| 7.8.3 Zylinderpotential | 201 |
| 7.8.4 Drucker Prager (DP) | 201 |
| 7.8.5 Extended Drucker Prager (EDP) | 202 |
| 7.8.6 Paraboloidansatz nach Chen | 203 |
| 7.8.7 William und Warnke | 204 |
| 7.8.8 Ottosen | 206 |
| 7.8.9 Rogge | 207 |
| 7.8.10 Cap-Modelle | 208 |
| 7.9 Numerische Modelle und Äquipotentialbedingungen zur Beschreibung von Stahl | 210 |
| 8 Modellierung des Materialverhaltens von Beton und Klebstoff | 212 |
| 8.1 Allgemeines | 212 |
| 8.2 Vorstellung des Materialmodells für Beton in allgemeiner Form | 212 |
| 8.2.1 Grundlagen | 212 |
| 8.2.2 Konstitutive Gleichungen | 213 |
| 8.2.3 Fließbedingung | 214 |
| 8.2.4 Approximation der Ver- und Entfestigung | 218 |
| 8.2.5 Projektionsalgorithmus | 219 |
| 8.2.6 Konsistente elasto-plastische Materialtangente | 223 |
| 8.3 Parameteridentifikation für die untersuchten Betone | 225 |
| 8.4 Modellierung des Materialverhaltens der untersuchten Klebstoffe | 228 |
| 8.4.1 Allgemeines | 228 |
| 8.4.2 Darstellung des Modells | 228 |
| 8.4.3 Die konsistente Tangentensteifigkeit | 229 |
| 8.4.4 Weitere Anpassungen | 232 |
| 8.5 Überprüfung der Implementierung | 234 |
| 8.5.1 Allgemeines | 234 |
| 8.5.2 Vergleich mit dem Standardmodell | 234 |
| 8.5.3 Berechnungen an einem Element | 234 |
| 8.5.4 Fazit | 236 |
| 8.6 Alternative Modellierung des Materialverhaltens der untersuchten Klebstoffe | 237 |
| 8.6.1 Allgemeines | 237 |
| 8.7 Parameteridentifikation für die untersuchten Klebstoffe | 237 |
| 8.7.1 Allgemeines | 237 |
| 8.7.2 Parameteridentifikation für den untersuchten EP-Klebstoff | 239 |
| 8.7.3 Parameteridentifikation für den untersuchten PU-Klebstoff | 240 |
| 9 Numerische Simulation durchgeföhrter Versuche | 242 |
| 9.1 Allgemeines | 242 |
| 9.2 Grundversuche | 242 |

Inhalt

| | | |
|-------------------|---|------------|
| 9.2.1 | Allgemeines | 242 |
| 9.2.2 | Simulation der EP-Bulkproben | 243 |
| 9.2.3 | Simulation der PU-Bulkproben | 246 |
| 9.2.4 | Zugscherproben – EP | 249 |
| 9.2.5 | Zugscherproben – PU | 253 |
| 9.2.6 | Zugversuche an stumpf verklebten Stahlzylindern | 256 |
| 9.3 | Geklebte Stahl-Beton-Verbundstrukturen | 259 |
| 9.3.1 | Schubversuche an ungeschlitzten Rohrproben | 259 |
| 9.3.2 | Verbundträger | 264 |
| 10 | Zusammenfassung und Ausblick | 274 |
| Literatur | | 277 |
| Lebenslauf | | 287 |