

# Inhaltsverzeichnis

|                                                                                 |            |
|---------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Kurzfassung.....</b>                                                         | <b>III</b> |
| <b>Vorwort .....</b>                                                            | <b>V</b>   |
| <b>Inhaltsverzeichnis.....</b>                                                  | <b>VII</b> |
| <b>Formelzeichen und Abkürzungen .....</b>                                      | <b>XIV</b> |
| <b>1      Einleitung .....</b>                                                  | <b>1</b>   |
| 1.1      Motivation, Anlass und Ziele.....                                      | 1          |
| 1.2      Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit.....                              | 2          |
| <b>2      Stand des Wissens .....</b>                                           | <b>3</b>   |
| 2.1      Verbund zwischen Stahl und Beton .....                                 | 3          |
| 2.1.1      Der Verbund als Grundlage des Verbundwerkstoffs Stahlbeton .....     | 3          |
| 2.1.2      Die Wirkungsweise des Verbunds .....                                 | 4          |
| 2.1.3      Die Ursachen von Verbundbeanspruchungen .....                        | 5          |
| 2.1.4      Die Verbundmechanismen .....                                         | 5          |
| 2.1.5      Die Versagensmechanismen.....                                        | 7          |
| 2.1.6      Die Einflussgrößen auf den Verbund .....                             | 13         |
| 2.2      Übergreifungsstöße mit gerippten Betonstahl und geraden Stabende.....  | 17         |
| 2.2.1      Versagensmechanismen .....                                           | 18         |
| 2.2.2      Lastübertragungsmodell.....                                          | 21         |
| 2.2.3      Tragfähigkeit von Übergreifungsstößen.....                           | 25         |
| 2.2.3.1      Einfluss der Übergreifungslänge .....                              | 26         |
| 2.2.3.2      Einfluss der Betondruck und -zugfestigkeit .....                   | 26         |
| 2.2.3.3      Einfluss des Stabdurchmesser .....                                 | 26         |
| 2.2.3.4      Einfluss der Lage der Stöße beim Betonieren .....                  | 26         |
| 2.2.3.5      Einfluss des Stoßabstands und der seitlichen Betondeckung .....    | 27         |
| 2.2.3.6      Einfluss des Abstands zwischen den gestoßenen Stäben.....          | 27         |
| 2.2.3.7      Einfluss der Art der Belastung .....                               | 27         |
| 2.2.3.8      Einfluss des Stoßanteils .....                                     | 28         |
| 2.2.3.9      Einfluss einer Querbewehrung im Stoßbereich .....                  | 28         |
| 2.2.3.10      Einfluss der Betondeckung an Balken-bzw. Plattenober- oder -      |            |
| unterseite .....                                                                | 29         |
| 2.2.4      Die Gebrauchstauglichkeit von Übergreifungsstößen.....               | 30         |
| 2.2.5      Ansatz zur genaueren Ermittlung der Übergreifungslängen nach         |            |
| Eligehausen .....                                                               | 32         |
| 2.2.6      Neuere Untersuchungen zum Einfluss des Stoßanteils nach Cairns ..... | 34         |
| <b>3      Stand der Normung .....</b>                                           | <b>37</b>  |
| 3.1      Normative Ermittlung der Verbundfestigkeit im GZT .....                | 37         |
| 3.1.1      DIN EN 1992-1-1 .....                                                | 37         |
| 3.1.2      Model Code 2010: 2013 .....                                          | 37         |

|         |                                                                                                               |           |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.2     | Normative Ermittlung der Übergreifungslänge von Rippenstahlstößen mit geraden Stabenden .....                 | 38        |
| 3.2.1   | Allgemeines.....                                                                                              | 38        |
| 3.2.2   | EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA .....                                                                      | 39        |
| 3.2.3   | Model Code 2010: 2013.....                                                                                    | 41        |
| 3.2.4   | SIA 262:2013 .....                                                                                            | 42        |
| 3.2.5   | ACI 318M: 2011 .....                                                                                          | 43        |
| 3.2.6   | Historische Entwicklung im deutschen Regelwerk .....                                                          | 44        |
| 3.2.6.1 | Verbundspannungen und Grundmaß der Verankerungslänge .....                                                    | 44        |
| 3.2.6.2 | Ansatz der Verbundspannungen .....                                                                            | 45        |
| 3.2.6.3 | Einfluss der Betondeckung .....                                                                               | 48        |
| 3.2.6.4 | Einfluss des seitlichen Stababstandes und des Stoßanteils.....                                                | 48        |
| 3.2.6.5 | Erkenntnisse aus Untersuchungen von Rehm/Eligehausen aus <i>DAfStb 291</i> und <i>Rehm 1977</i> .....         | 50        |
| 3.2.6.6 | Erkenntnisse aus Untersuchungen aus <i>Stöckl 1972</i> .....                                                  | 53        |
| 3.2.7   | Vergleich der unterschiedlichen Berechnungsansätze an Beispielen .....                                        | 55        |
| 4       | <b>Eigene experimentelle Untersuchungen zum Verbundverhalten.....</b>                                         | <b>58</b> |
| 4.1     | Versuchsprogramm .....                                                                                        | 58        |
| 4.2     | Versuchskörperbeschreibung .....                                                                              | 58        |
| 4.2.1   | Geometrie.....                                                                                                | 58        |
| 4.3     | Materialkennwerte .....                                                                                       | 61        |
| 4.3.1   | Beton.....                                                                                                    | 61        |
| 4.3.2   | Betonstahl .....                                                                                              | 61        |
| 4.4     | Herstellung der Versuchskörper .....                                                                          | 63        |
| 4.5     | Beschreibung des Versuchsstands .....                                                                         | 63        |
| 4.6     | Messtechnik .....                                                                                             | 64        |
| 4.6.1   | Allgemeines.....                                                                                              | 64        |
| 4.6.2   | Schlupfmessung .....                                                                                          | 64        |
| 4.6.3   | Aufzeichnung der Rissentwicklung.....                                                                         | 65        |
| 4.7     | Versuchsdurchführung .....                                                                                    | 65        |
| 4.8     | V Versuchsergebnisse .....                                                                                    | 66        |
| 4.8.1   | Verbundspannungs-Schlupf Beziehungen.....                                                                     | 66        |
| 4.8.2   | Einfluss der Betondruckfestigkeit auf die Verbundfestigkeit .....                                             | 68        |
| 4.8.3   | Einfluss der Betondeckung auf die Verbundfestigkeit .....                                                     | 71        |
| 4.8.4   | Rissverhalten.....                                                                                            | 73        |
| 4.8.5   | Einfluss einer nicht angeschweißten Querbewehrung.....                                                        | 75        |
| 4.8.6   | Verbundspannung nach EN 1992-1-1 .....                                                                        | 75        |
| 4.8.7   | Zusammenfassung, Wertung .....                                                                                | 76        |
| 5       | <b>Spezifische Versuche für Bauwerke der Verkehrsinfrastruktur – eigene Versuche an der TU Dortmund .....</b> | <b>77</b> |
| 5.1     | Entwicklung der systematischen Versuchsreihen .....                                                           | 77        |
| 5.1.1   | Definition der Randbedingungen .....                                                                          | 77        |

|          |                                                                                 |            |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 5.1.2    | Wahl der Prüfkörperabmessungen .....                                            | 77         |
| 5.1.3    | Vordimensionierung der kombinierten Übergreifungsstöße .....                    | 80         |
| 5.2      | Herstellung der Versuchsträger .....                                            | 82         |
| 5.2.1    | Wahl von Bewehrung und Beton .....                                              | 84         |
| 5.2.1.1  | Bewehrung .....                                                                 | 84         |
| 5.2.1.2  | Beton .....                                                                     | 84         |
| 5.3      | Versuchsaufbau und Messtechnik .....                                            | 85         |
| 5.3.1    | Lagerung der Versuchsträger .....                                               | 85         |
| 5.3.2    | Anordnung der Pressen .....                                                     | 86         |
| 5.3.3    | Messtechnik .....                                                               | 86         |
| 5.3.3.1  | Allgemeines .....                                                               | 86         |
| 5.3.3.2  | Kraftmessdosen .....                                                            | 87         |
| 5.3.3.3  | Dehnungsmessstreifen (DMS) .....                                                | 87         |
| 5.3.3.4  | Induktive Wegaufnehmer .....                                                    | 89         |
| 5.3.3.5  | Optische Messung .....                                                          | 90         |
| 5.3.3.6  | Messung der Rissbreiten .....                                                   | 91         |
| 5.3.4    | Festlegung der Einwirkung für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit ..         | 92         |
| 5.4      | V Versuchsergebnisse .....                                                      | 92         |
| 5.4.1    | Tragverhalten .....                                                             | 92         |
| 5.4.2    | Traglasten im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) .....                        | 96         |
| 5.4.3    | Rissbreiten für ausgewählte Laststufen .....                                    | 99         |
| <b>6</b> | <b>Eigene spezifische Versuche zu Übergreifungsstößen unter Dauerlast .....</b> | <b>102</b> |
| 6.1      | Motivation .....                                                                | 102        |
| 6.2      | Entwicklung der systematischen Versuchsreihen .....                             | 102        |
| 6.2.1    | Definition der Randbedingungen .....                                            | 102        |
| 6.2.2    | Wahl der Prüfkörperabmessungen .....                                            | 103        |
| 6.3      | Materialkennwerte .....                                                         | 103        |
| 6.3.1    | Betonstahl .....                                                                | 103        |
| 6.3.2    | Beton .....                                                                     | 104        |
| 6.4      | Versuchsstand .....                                                             | 104        |
| 6.5      | Versuchsdurchführung .....                                                      | 105        |
| 6.6      | V Versuchsergebnisse .....                                                      | 106        |
| 6.6.1    | Tragverhalten .....                                                             | 106        |
| 6.6.1.1  | Tragfähigkeit .....                                                             | 106        |
| 6.6.1.2  | Last- Durchbiegungsverhalten .....                                              | 107        |
| 6.6.1.3  | Spannungen im Stoßbereich .....                                                 | 107        |
| 6.6.1.4  | Dauerstandversuch .....                                                         | 109        |
| 6.6.2    | Rissbreiten .....                                                               | 111        |
| 6.6.2.1  | Träger B14 .....                                                                | 112        |
| 6.6.2.2  | Träger B15 .....                                                                | 112        |
| 6.7      | Vergleich mit baugleichen statischen Versuchen .....                            | 116        |

|          |                                                                                                                                                    |            |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 6.7.1    | Versagen im GZT .....                                                                                                                              | 116        |
| 6.7.2    | Last- Durchbiegungsverhalten .....                                                                                                                 | 117        |
| 6.7.3    | Spannungen im Stoßbereich .....                                                                                                                    | 117        |
| 6.7.4    | Rissbreiten.....                                                                                                                                   | 117        |
| 6.7.5    | Zusammenfassung und Wertung .....                                                                                                                  | 117        |
| <b>7</b> | <b>Ergänzende eigene Versuche zu Übergreifungsstößen bei 2-lagiger Bewehrung und großer Betondeckung .....</b>                                     | <b>119</b> |
| 7.1      | Problemstellung .....                                                                                                                              | 119        |
| 7.2      | Unterschiede zwischen den Regelungen der EN 1992-2 und DIN EN 1992-2/NA für die Ausbildung von Übergreifungsstößen bei mehrlagiger Bewehrung ..... | 120        |
| 7.3      | Stand des Wissens bei Stößen in mehrlagiger Bewehrung.....                                                                                         | 121        |
| 7.4      | Entwicklung der systematischen Versuchsreihen .....                                                                                                | 121        |
| 7.4.1    | Definition der Randbedingungen .....                                                                                                               | 121        |
| 7.4.2    | Wahl der Prüfkörperabmessungen .....                                                                                                               | 122        |
| 7.4.3    | Wahl von Bewehrung und Beton .....                                                                                                                 | 124        |
| 7.4.3.1  | Betonstahl .....                                                                                                                                   | 124        |
| 7.4.3.2  | Beton.....                                                                                                                                         | 124        |
| 7.5      | Versuchsaufbau und Messtechnik .....                                                                                                               | 126        |
| 7.6      | V Versuchsergebnisse .....                                                                                                                         | 126        |
| 7.6.1    | Tragverhalten .....                                                                                                                                | 126        |
| 7.6.2    | Traglasten im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) .....                                                                                           | 128        |
| 7.6.3    | Rissbreiten im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG) .....                                                                                  | 132        |
| 7.6.4    | Bewertung der Ergebnisse .....                                                                                                                     | 134        |
| <b>8</b> | <b>Projektbezogene Versuchsreihe für einen Tunnel mit besonders großer Betondeckung.....</b>                                                       | <b>136</b> |
| 8.1      | Vorbemerkung.....                                                                                                                                  | 136        |
| 8.2      | Entwicklung der systematischen Versuchsreihen .....                                                                                                | 137        |
| 8.2.1    | Definition der Randbedingungen .....                                                                                                               | 137        |
| 8.2.2    | Bemessung der kombinierten Übergreifungsstöße.....                                                                                                 | 137        |
| 8.2.3    | Wahl der Prüfkörperabmessungen .....                                                                                                               | 139        |
| 8.2.4    | Wahl von Bewehrung und Beton.....                                                                                                                  | 143        |
| 8.2.4.1  | Beton.....                                                                                                                                         | 144        |
| 8.2.4.2  | Betonstahl .....                                                                                                                                   | 144        |
| 8.3      | Versuchsaufbau und Messtechnik .....                                                                                                               | 145        |
| 8.3.1    | Messung der Rissbreiten.....                                                                                                                       | 145        |
| 8.3.2    | Messung der Betonstahldehnung .....                                                                                                                | 145        |
| 8.4      | V Versuchsergebnisse .....                                                                                                                         | 146        |
| 8.4.1    | Traglasten im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) .....                                                                                           | 146        |
| 8.4.2    | Rissbreiten im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG) .....                                                                                  | 149        |
| 8.5      | Zusammenfassung und Wertung.....                                                                                                                   | 152        |

|           |                                                                                                                                          |            |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>9</b>  | <b>Auswertung der Stahlspannung im Bruchzustand nach Model Code 2010..</b>                                                               | <b>154</b> |
| <b>10</b> | <b>Ergänzende eigene Versuche zu Übergreifungsstößen unter dem Gesichtspunkt des Einflusses einer Querbewehrung im Stoßbereich .....</b> | <b>157</b> |
| 10.1      | Motivation.....                                                                                                                          | 157        |
| 10.2      | Entwicklung der systematischen Versuchsreihen.....                                                                                       | 158        |
| 10.2.1    | Definition der Randbedingungen .....                                                                                                     | 158        |
| 10.2.2    | Wahl von Bewehrung und Beton .....                                                                                                       | 160        |
| 10.3      | Versuchsaufbau und Messtechnik .....                                                                                                     | 160        |
| 10.4      | V Versuchsergebnisse .....                                                                                                               | 160        |
| 10.4.1    | Versuchsträger B16.....                                                                                                                  | 160        |
| 10.4.1.1  | Tragverhalten.....                                                                                                                       | 160        |
| 10.4.1.2  | Rissbildung.....                                                                                                                         | 163        |
| 10.4.2    | Versuchsträger B17.....                                                                                                                  | 164        |
| 10.4.2.1  | Tragverhalten.....                                                                                                                       | 164        |
| 10.4.2.2  | Rissbildung.....                                                                                                                         | 167        |
| 10.4.3    | Zusammenfassung und Vergleich.....                                                                                                       | 169        |
| 10.4.3.1  | Rissbreiten .....                                                                                                                        | 169        |
| 10.4.3.2  | Traglasten im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT).....                                                                                  | 170        |
| 10.5      | Zusammenfassung und Wertung .....                                                                                                        | 173        |
| <b>11</b> | <b>Nummerische Simulation von Zugstößen .....</b>                                                                                        | <b>174</b> |
| 11.1      | Zweck der Untersuchungen .....                                                                                                           | 174        |
| 11.2      | Modelierung der Versuchsträger .....                                                                                                     | 174        |
| 11.2.1    | Materialmodelle .....                                                                                                                    | 174        |
| 11.2.1.1  | Beton.....                                                                                                                               | 174        |
| 11.2.1.2  | Betonstahl.....                                                                                                                          | 175        |
| 11.2.1.3  | Verbund .....                                                                                                                            | 175        |
| 11.2.2    | Lösungsverfahren.....                                                                                                                    | 176        |
| 11.2.3    | Strukturmodell .....                                                                                                                     | 178        |
| 11.3      | Validierung des FE Modells durch Versuchsnachrechnungen.....                                                                             | 178        |
| 11.3.1    | Modellierung des Betons .....                                                                                                            | 178        |
| 11.3.2    | Modellierung des Betonstahls .....                                                                                                       | 179        |
| 11.3.3    | Verbundeigenschaften.....                                                                                                                | 180        |
| 11.3.4    | Aufbringung der Belastung.....                                                                                                           | 182        |
| 11.3.5    | Ergebnisse der Nachrechnung von Versuch B2.....                                                                                          | 182        |
| 11.3.6    | Ergebnisse der Nachrechnung von Versuch B1 .....                                                                                         | 184        |
| 11.3.7    | Ergebnisse der Nachrechnung von Versuch B10 .....                                                                                        | 186        |
| 11.3.8    | Zusammenfassung der Ergebnisse des Validierungsberechnungen .....                                                                        | 188        |
| 11.4      | Parametervariation.....                                                                                                                  | 188        |
| 11.4.1    | Variation der Betonzugfestigkeit.....                                                                                                    | 188        |
| 11.4.2    | Variation der Betondeckung.....                                                                                                          | 191        |
| 11.4.3    | Kombination von Zugfestigkeit und Betondeckung.....                                                                                      | 194        |

|           |                                                                                                                                                        |            |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 11.4.4    | Numerische Simulationen zur Tragfähigkeit bei veränderlicher Zugkraft<br>längs des Stoßes .....                                                        | 197        |
| <b>12</b> | <b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>                                                                                                              | <b>199</b> |
| 12.1      | Zusammenfassung.....                                                                                                                                   | 199        |
| 12.2      | Ausblick.....                                                                                                                                          | 200        |
|           | <b>Literaturverzeichnis .....</b>                                                                                                                      | <b>201</b> |
|           | <b>Anhang.....</b>                                                                                                                                     | <b>207</b> |
| <b>A</b>  | <b>Anhang BEAM END TESTS .....</b>                                                                                                                     | <b>209</b> |
| A.1       | Auswertung der Verbundspannungen aus den Beam-End Tests .....                                                                                          | 209        |
| A.2       | Verbundspannungs – Schlupfkurven der Beam End-Tests .....                                                                                              | 210        |
| A.2.1     | Versuchskörper BEc20a .....                                                                                                                            | 210        |
| A.2.2     | Versuchskörper BEc20b .....                                                                                                                            | 210        |
| A.2.3     | Versuchskörper BEc40a .....                                                                                                                            | 211        |
| A.2.4     | Versuchskörper BEc40b .....                                                                                                                            | 211        |
| A.2.5     | Versuchskörper BEc60a .....                                                                                                                            | 212        |
| A.2.6     | Versuchskörper BEc60b .....                                                                                                                            | 212        |
| A.2.7     | Versuchskörper BEc80a .....                                                                                                                            | 213        |
| A.2.8     | Versuchskörper BEc80b .....                                                                                                                            | 213        |
| A.2.9     | Versuchskörper BEc40a2530.....                                                                                                                         | 214        |
| A.3       | Bruchbilder der Beam-End Tests .....                                                                                                                   | 215        |
| A.4       | Rissbildung Beam-End Tests .....                                                                                                                       | 217        |
| A.4.1     | Versuchskörper BEc20a .....                                                                                                                            | 217        |
| A.4.2     | Versuchskörper BEc20b .....                                                                                                                            | 220        |
| A.4.3     | Versuchskörper BEc40a .....                                                                                                                            | 223        |
| A.4.4     | Versuchskörper BEc40b .....                                                                                                                            | 226        |
| A.4.5     | Versuchskörper BEc60a .....                                                                                                                            | 229        |
| A.4.6     | Versuchskörper BEc60b .....                                                                                                                            | 232        |
| A.4.7     | Versuchskörper BEc80a .....                                                                                                                            | 235        |
| A.4.8     | Versuchskörper BEc80b .....                                                                                                                            | 238        |
| A.5       | Eigenschaften des Frischbetons.....                                                                                                                    | 241        |
| A.6       | Übersicht der verwendeten Betonchargen .....                                                                                                           | 241        |
| A.7       | Spannungs-Dehnungs-Linie desverwendeten Betonstahls Ø20 .....                                                                                          | 242        |
| A.8       | Umrechnung der mittleren Würfeldruckfestigkeit in die mittlere Zugfestigkeit<br>/ Abgleich mit der an Prüfkörpern ermittelten Spaltzugfestigkeit ..... | 242        |
| <b>B</b>  | <b>Anhang Vierpunktbiegeversuche .....</b>                                                                                                             | <b>243</b> |
| B.1       | Ergebnisse Versuchsträger B1.....                                                                                                                      | 243        |
| B.2       | Ergebnisse Versuchsträger B2.....                                                                                                                      | 253        |
| B.3       | Ergebnisse Versuchsträger B3.....                                                                                                                      | 263        |
| B.4       | Ergebnisse Versuchsträger B4.....                                                                                                                      | 277        |

|      |                                                                          |     |
|------|--------------------------------------------------------------------------|-----|
| B.5  | Ergebnisse Versuchsträger B5 .....                                       | 290 |
| B.6  | Ergebnisse Versuchsträger B6 .....                                       | 304 |
| B.7  | Ergebnisse Versuchsträger B7 .....                                       | 318 |
| B.8  | Ergebnisse Versuchsträger B8 .....                                       | 332 |
| B.9  | Ergebnisse Versuchsträger B9 .....                                       | 339 |
| B.10 | Ergebnisse Versuchsträger B10.....                                       | 353 |
| B.11 | Entwicklung der Betonfestigkeiten.....                                   | 366 |
| B.12 | Eigenschaften des Frischbetons.....                                      | 371 |
| B.13 | Betonzusammensetzung .....                                               | 371 |
| B.14 | Schal- und Bewehrungspläne der Versuchsträger.....                       | 372 |
| B.15 | Ergebnisse der Versuchsträger B14 und B15.....                           | 374 |
| B.16 | Entwicklung der Betonfestigkeiten der Chargen C1-C3, Balken B11-B13 .... | 383 |
| B.17 | Ergebnisse Versuchsträger B11.....                                       | 385 |
| B.18 | Ergebnisse Versuchsträger B12.....                                       | 388 |
| B.19 | Ergebnisse Versuchsträger B13.....                                       | 391 |