

Formelzeichen und Abkürzungen	IV
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangspunkt und Motivation	1
1.2 Zielstellung	2
1.3 Gliederung der Arbeit.....	4
2 Grundlagen des Berechnungsmodells.....	7
2.1 Energiemethoden und Variationsprinzipien	7
2.1.1 Energiegleichung	7
2.1.2 Statische Formulierung	8
2.1.3 Kinematische Formulierung	10
2.1.4 Gemischte Formulierung.....	11
2.2 Energiemethode mit integraler Beschreibung des Materialverhaltens.....	12
2.2.1 Grundlagen und Annahmen	12
2.2.2 Formänderungen und Verträglichkeitsbedingungen	13
2.2.2.1 Elementverformungen	13
2.2.2.2 Querschnittsdeformationen	14
2.2.3 Materialgesetze	15
2.2.4 Potential und Extremalbedingungen	16
2.2.4.1 Querschnittsanalyse	16
2.2.4.2 Elementanalyse.....	18
2.2.5 Gleichgewichtsbedingungen	19
2.2.6 Grenzbeanspruchung	20
3 Materialverhalten und Modellbildung.....	21
3.1 Beton	21
3.1.1 Phänomenologie des Betons.....	21
3.1.2 Kurzzeittragverhalten unter Druckbeanspruchung.....	21
3.1.3 Kurzzeittragverhalten unter Zugbeanspruchung	22
3.1.4 Mathematische Beschreibung des Kurzzeittragverhaltens	23
3.1.5 Zeitabhängige Festigkeits- und Steifigkeitsentwicklung des Betons	25
3.1.6 Schwinden	28
3.1.7 Kriechen.....	29
3.1.7.1 Langzeitverhalten bei konstanter Betonbeanspruchung.....	29
3.1.7.2 Kriechen bei veränderlichen Spannungen.....	32
3.1.7.3 Verfahren zur Bestimmung der Kriechzahl.....	33
3.1.7.4 Nichtlinearität des Kriechens bei hohen Spannungen	35
3.1.8 Diskretisierung der zeitabhängigen Materialbeziehungen des Betons	37
3.2 Stahl.....	39
3.2.1 Tragverhalten von Bau-, Beton- und Spannstahl	39
3.2.2 Mathematische Beschreibung des Formänderungsverhaltens	40
3.2.3 Spannstahlrelaxation.....	42
3.2.4 Langzeitverhalten des Spannstahls unter veränderlichen Dehnungen	44

4	Verbundverhalten und Modellbildung.....	47
4.1	Berücksichtigung des unterschiedlichen Verbundverhaltens.....	47
4.2	Stahlbeton- und Spannbetonelemente.....	47
4.2.1	Verbundverhalten	47
4.2.2	Mathematische Beschreibung des Verbundverhaltens der Bewehrung unter Kurzzeitbeanspruchung	49
4.2.3	Verschmiertes Rissmodell für kurzzeitige Beanspruchung	51
4.2.4	Mathematische Beschreibung des verschmierten Rissmodells.....	53
4.2.4.1	Querschnitte mit 'schlaffer Bewehrung	53
4.2.4.2	Gemischt bewehrte und vorgespannte Querschnitte.....	56
4.2.5	Verbundkriechen	59
4.3	Verbundelemente	60
4.3.1	Allgemeines zu Verbundelementen	60
4.3.2	Tragverhalten in Abhängigkeit der Verbundart	60
4.3.3	Berechnungsmodelle zur Berücksichtigung des nachgiebigen Verbundes.....	62
4.3.3.1	Entwicklung der Berechnungsmodelle	62
4.3.3.2	Theorie des elastischen Verbundes.....	63
4.3.4	Verbundsicherung	65
4.3.5	Trag- und Verformungsverhalten von Kopfbolzendübeln	65
4.3.5.1	Wirkungsweise und Tragmechanismen von Kopfbolzendübeln	65
4.3.5.2	Analytische Beschreibung der Dübelkennlinien.....	67
4.3.5.3	Dübeltragfähigkeit	68
4.3.5.4	Gegenüberstellung des Dübeltragverhaltens beim Push-Out-Versuch und beim Trägerversuch.....	69
5	Numerische Umsetzung auf Querschnittsebene	71
5.1	Formänderungen und Diskretisierung des Querschnitts	71
5.2	Berechnung der Formänderungsenergie	73
5.3	Schnittgrößenberechnung.....	76
5.4	Materialgesetze	77
5.4.1	Allgemeines multilineares Materialgesetz	77
5.4.2	Nichtlineare Materialgesetze für Beton unter Druckbeanspruchung	79
5.4.3	Materialgesetze zur Erfassung des Betonzugtragverhaltens	82
5.4.4	Differentielles Materialgesetz des Betons	83
5.4.5	Differentielles Materialgesetz des Spannstahls	86
5.5	Formulierung der Optimierungsaufgabe und Eindeutigkeit der Lösung	87
5.6	Rechentechnische Umsetzung auf Querschnittsebene	89
5.7	Prinzipbeispiele	93
5.7.1	Vergleichende Untersuchungen zur Berücksichtigung des „tension-stiffening“ auf der Beton- bzw. Stahlseite	93
5.7.1.1	Stahlbetonquerschnitt.....	93
5.7.1.2	Spannbetonquerschnitt mit gemischter Bewehrung	97
5.7.2	Untersuchungen zum Einfluss der Zeitintegration auf die berechneten Dehnungen und Spannungen.....	102

5.7.3 Untersuchungen zur zeitabhängigen Spannungs- und Dehnungsentwicklung unter Biegebeanspruchung am gerissenen Querschnitt 105

6 Numerische Umsetzung auf Elementebene..... 108

6.1 Definitionen und Diskretisierung 108

6.2 Formänderungsbeziehungen und numerische Differentiation 109

6.2.1 Approximation der Formänderungen 109

6.2.2 Erfassung der geometrischen Nichtlinearität und der Vorverformungen 111

6.3 Gesamtpotential und Formulierung der Optimierungsaufgabe 112

6.3.1 Formänderungsenergie und numerische Integration 112

6.3.2 Potential der äußeren Einwirkungen 113

6.3.3 Formulierung der Optimierungsaufgabe 114

6.4 Wahl der Interpolationsfunktion und der Quadraturformel 116

6.5 Nachgiebiger Verbund..... 121

6.5.1 Definitionen und Annahmen 121

6.5.2 Kinematik des Verbundmodells 122

6.5.2.1 Gekoppeltes Verbundmodell..... 122

6.5.2.2 Entkoppeltes Verbundmodell..... 123

6.5.3 Formänderungsenergie der Verbundfuge 124

6.5.3.1 Formänderungsenergie des Haft- und Reibungsverbundes..... 124

6.5.3.2 Formänderungsenergie der Verbundmittel 125

6.5.4 Diskretes und kontinuierliches Verbundmodell..... 128

6.6 Nachgiebige Lagerung 129

6.7 Rechentechnische Umsetzung auf Elementebene..... 131

6.8 Verifizierung, Validierung und Anwendung 134

6.8.1 Gegenüberstellung der analytischen und der numerischen Lösung des verschieblichen Verbundes 134

6.8.2 Nachrechnung von Versuchen an Holz-Beton-Verbundträger mit Dübelleisten 137

6.8.3 Untersuchungen an Stahl-Beton-Verbundträgern mit hochfesten Baustoffen.. 141

6.8.4 Nachrechnungen von Stahl-Beton-Verbunddurchlaufträgern 147

6.8.5 Stahlbetondruckglieder unter zweiachsiger Biegebeanspruchung 153

6.8.6 Anwendungsbeispiel – Analyse eines PREFLEX-Verbundträgers 156

7 Zusammenfassung und Ausblick 162

7.1 Zusammenfassung..... 162

7.2 Ausblick..... 164

Literaturverzeichnis..... 167

Anhang