

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	