

Inhalt

1	Einleitung	15	3.5	Materialmodelle für Beton in der FEM	30
1.1	Problemstellung	15	3.5.1	Allgemeines	30
1.2	Zielsetzung und Vorgehen	16	3.5.2	Nichtlineare Elastizitätstheorie	31
1.3	Abgrenzung des Projektumfangs	16	3.5.3	Plastizitätstheorie	33
2	Wissenschaftliche Methoden für die Nachrechnung von bestehenden Brücken	17	3.5.4	Schädigungs- und Mikrorisstheorie	37
2.1	Allgemeines	17	3.5.5	Kombinierte elastoplastische Schädigungstheorie	39
2.2	Genauere analytische Verfahren	17	3.5.6	Microplane-Theorie	39
2.3	Ermittlung der Tragfähigkeit mit nichtlinearen Verfahren	17	3.6	Modellierung der Rissbildung von Beton	40
2.4	Probabilistische Nachweisführung	18	3.6.1	Allgemeines	40
2.5	Reduzierung von Unsicherheiten durch Kompensationsmaßnahmen	19	3.6.2	Kontinuumsmodelle mit Diskontinuität	41
2.6	Akzeptierte Versagenswahrscheinlichkeiten	19	3.6.3	Kontinuumsmodelle ohne Diskontinuität	42
2.7	Lebensqualitätsindex (LQI)	20	3.6.4	Objektivität und Netzabhängigkeit	44
2.8	Fazit	20	3.7	Berücksichtigung des Verbunds	44
3	Grundlagen für nichtlineare Berechnungen	20	3.7.1	Starrer Verbund	45
3.1	Einführung	20	3.7.2	Bond-Elemente	45
3.2	Werkstoffverhalten Beton	21	3.7.3	Tension Stiffening	45
3.2.1	Allgemeines	21	3.8	Modellierung von Stahlbeton	45
3.2.2	Einaxiales Betonverhalten	21	3.8.1	Klassische Methode	45
3.2.3	Zweiaxiales Betonverhalten	23	3.8.2	Embedded Elements	46
3.2.4	Dreiaxiales Betonverhalten	24	3.8.3	Layer-Methode	46
3.3	Werkstoffverhalten von Stahl	25	3.8.4	Compression Field Theory	48
3.3.1	Allgemeines	25	3.9	Grundlagen der (nichtlinearen) FEM	48
3.3.2	Bewehrungsstahl	25	3.9.1	Allgemeines	48
3.3.3	Spannstahl	26	3.9.2	Finite-Elemente-Methode	49
3.4	Werkstoffverhalten Stahlbeton	26	3.9.3	Newton-Raphson-Verfahren	49
3.4.1	Allgemeines	26	3.9.4	Elementtypen	50
3.4.2	Verbund	26	4	Numerische Simulationen des Tragverhaltens ausgewählter Versuchsbalken	52
3.4.3	Rissverzahnung	27	4.1	Allgemeines	52
3.4.4	Dübelwirkung der Bewehrung	28	4.2	Kurzvorstellung der verwendeten Programmsysteme	52
3.4.5	Versuche an bewehrten Bauteilen	29			

4.2.1	ABAQUS	52	4.6.1	ABAQUS	96
4.2.2	ATENA	56	4.6.2	ATENA	97
4.2.3	SOFISTIK	62	4.6.3	SOFISTIK	99
4.2.4	InfoCAD	66	4.6.4	InfoCAD	100
4.3	Beschreibung der untersuchten Versuchsbalken	67	4.7	Balken BM100: Simulation Stahl- betonträger mit Bügelbewehrung – Schubversagen	102
4.3.1	Balken 10: Stahlbetonträger ohne Bügelbewehrung – Biegeversagen	67	4.7.1	ABAQUS	102
4.3.2	Balken E4: Stahlbetonträger mit Bügelbewehrung – Biegeversagen	69	4.7.2	ATENA	104
4.3.3	Balken E6: Stahlbetonträger ohne Bügelbewehrung – Schubversagen	70	4.7.3	SOFISTIK	106
4.3.4	Balken BM100: Stahlbetonträger mit Bügelbewehrung – Schubversagen	71	4.8	Balken ET3: Simulation Stahl- betonträger mit Bügelbewehrung – Schubversagen	107
4.3.5	Balken ET3: Stahlbetonträger mit Bügelbewehrung – Schubversagen	72	4.8.1	ABAQUS	107
4.3.6	Balken B4: Spannbetonträger mit Bügelbewehrung – Biegeversagen	73	4.8.2	ATENA	111
4.3.7	Balken TP3: Spannbetonträger mit Bügelbewehrung – Biegeversagen	74	4.8.3	SOFISTIK	113
4.3.8	Balken DLT1: Spannbetonträger mit Bügelbewehrung – Schubversagen	76	4.9	Balken B4: Simulation Spann- betonträger mit Bügelbewehrung – Biegeversagen	114
4.3.9	Balken VT1: Spannbetonträger mit Bügelbewehrung – Schubversagen	78	4.9.1	ABAQUS	114
4.4	Balken 10: Simulation Stahlbeton- träger ohne Bügelbewehrung – Biegeversagen	80	4.9.2	ATENA	117
4.4.1	ABAQUS	80	4.9.3	SOFISTIK	120
4.4.2	ATENA	82	4.9.4	InfoCAD	121
4.4.3	SOFISTIK	84	4.10	Balken TP3: Simulation Spann- betonträger mit Bügelbewehrung – Biegeversagen	123
4.4.4	InfoCAD	85	4.10.1	ABAQUS	123
4.5	Balken E4: Simulation Stahlbeton- träger mit Bügelbewehrung – Biegeversagen	86	4.10.2	ATENA 2D	128
4.5.1	ABAQUS	86	4.10.3	ATENA 3D	130
4.5.2	ATENA	89	4.10.4	SOFISTIK	133
4.5.3	SOFISTIK	92	4.11	Balken DLT1: Simulation Spann- betondurchlaufträger mit Bügel- bewehrung – Schubversagen	135
4.5.4	InfoCAD	93	4.11.1	ABAQUS	135
4.6	Balken E6: Simulation Stahlbeton- träger ohne Bügelbewehrung – Schubversagen	96	4.11.2	ATENA 2D	140
			4.11.3	ATENA 3D	142
			4.11.4	SOFISTIK	145
			4.11.5	InfoCAD	146

4.12	Balken VT1: Simulation Spann- betonträger mit Bügelbewehrung – Schubversagen	149	6.3	Vorhandene Ansätze für Sicherheits- konzepte für Systeme mit nicht- linearem Verhalten	176
4.12.1	ABAQUS	149	6.3.1	Allgemeines	176
4.12.2	ATENA	154	6.3.2	Festlegungen/Vorgaben in aktuellen Normen und Modellnormen (Model Codes)	177
4.12.3	SOFISTIK	157	6.3.3	γ_R -Verfahren	177
4.13	Vergleich und Bewertung der Nachrechnung von Versuchen	158	6.3.4	ECOV (Model Code 2010)	178
4.13.1	Vergleich der rechnerischen Traglasten	158	6.3.5	Partial factor method (Berechnung mit Bemessungswerten)	179
4.13.2	Abschätzung eines Modellanpassungsfaktors	160	6.3.6	Probabilistic method (SARA)	179
4.13.3	Vergleich der Last-Verformungs- kurven	161	6.4	Anwendung der vorhandenen Sicherheitskonzepte bei numerischen Simulationen von Versuchsbalken	181
4.13.4	Bewertung der Ergebnisse	163	6.4.1	Einleitung	181
5	Grundlagen zur Sicherheit im Bauwesen	164	6.4.2	Versuchsbalken 10	181
5.1	Allgemeines	164	6.4.3	Versuchsbalken E4	182
5.1.1	Relevante Wahrscheinlichkeits- verteilungen für das Bauwesen	164	6.4.4	Versuchsbalken E6	183
5.1.2	Zweidimensionale kontinuierliche Wahrscheinlichkeitsverteilungen	168	6.4.5	Versuchsbalken BM100	184
5.1.3	Der zentrale Grenzwertsatz	168	6.4.6	Versuchsbalken ET3	185
5.2	Grundlagen der Zuverlässigkeits- theorie	169	6.4.7	Versuchsbalken B4	186
5.2.1	Level-3-Methoden	169	6.4.8	Versuchsbalken TP3	187
5.2.2	Level-2-Methoden	170	6.4.9	Versuchsbalken DLT1	188
5.2.3	Level-1-Methoden	173	6.4.10	Versuchsbalken VT1	189
5.2.4	Zielwahrscheinlichkeiten in Normen	174	6.5	Zusammenfassende statistische Auswertung	190
5.2.5	Streuungen der Basisvariablen	175	6.6	Fazit	193
6	Einhaltung der erforderlichen Sicherheit bei nichtlinearen Berechnungen	176	7	Abschließende Auswertung der durchgeführten Unter- suchungen	193
6.1	Allgemeines	176	7.1	Numerische Simulation der Tragfähigkeit	193
6.2	Besonderheiten bei nichtlinearen Berechnungen/Unterschiede zur Standardbemessung	176	7.2	Sicherheitskonzepte für nicht- lineare Berechnungen	194
			7.3	Empfehlungen für die Fort- schreibung der Nachrechnungs- richtlinie	195
			7.3.1	Ergänzung der Nachweisstufe 4	195

7.3.2	Benchmarkbeispiele	196
7.3.3	Zukünftiges Entwicklungspotenzial für die Stufe 2	196
7.4	Weiterer Forschungsbedarf	197
8	Zusammenfassung und Ausblick ...	197
9	Literatur	199
Anhänge		205
Anhang A 1:	Anwendung des γ_R -Verfahrens an Versuchsträgern	205
Anhang A 2:	Anwendung der ECOV-Methode an Versuchsträgern	212
Anhang A 3:	Anwendung der Partial Factor Method an Versuchsträgern ...	224
Anhang A 4:	Berechnung mit streuenden Materialparametern (SARA) ...	231