

Deutsche
Forschungsgemeinschaft

Bewehrte Betonbauteile unter Betriebsbedingungen

Herausgegeben von
Rolf Eligehausen,
Karl Kordina
und Peter Schießl

Forschungsbericht

 **WILEY-VCH**

DFG

Inhalt

Vorwort	XVII
Teil I Rißbreiten	1
<i>Gert König</i>	
1 Ein mechanisches Modell zur Erhöhung der Vorhersagegenauigkeit über die Rißbreiten unter Betriebsbedingungen	3
<i>Gert König und Michael Fischer</i>	
1.1 Einleitung und Zielsetzung	3
1.2 Versuchsprogramm	4
1.2.1 Versuchskörper	4
1.2.1.1 Querschnittwahl und Bewehrungsführung	4
1.2.1.2 Herstellung der Versuchskörper – Betonrezeptur – Versuchsaufbau	6
1.2.1.3 Vorbereitung der Temperaturmeß-, Regel- und Steuerstrecke	7
1.3 Meßtechnik	8
1.3.1 Durchzuführende Messungen	8
1.3.2 Messung der Rißbreiten, der Verformungen und der Dehnungsebenen	10
1.3.3 Messung der aufgebrachten Last und der Auflagerkräfte	10
1.3.4 Messung der Temperaturen	10
1.3.5 Meßdatenerfassung	11
1.4 Belastung und Versuchsdurchführung	12
1.4.1 Belastungsgeschichte	12
1.4.2 Versuchsdurchführung	12
1.5 Literatur	14
2 Rißbreiten und Verformungszunahme vorgespannter Bauteile unter wiederholter Last- und Zwangbeanspruchung	15
<i>Gert König und Michael Fischer</i>	
2.1 Einleitung und Zielsetzung	15
2.2 Versuchsprogramm	16
2.2.1 Versuchskörper	16
2.2.1.1 Statisches System und Bewehrung	16
2.2.1.2 Herstellung und begleitendes Versuchsprogramm	17

Teil II Verbundfragen	87
<i>Rolf Eligehausen</i>	
1 Ein mechanisches Modell zur Beschreibung des Verbundverhaltens zwischen Stahl und Beton	90
<i>Gert König, Nguyen V. Tue und Wolfgang Kurz</i>	
1.1 Einleitung	90
1.2 Beschreibung der Kraftübertragung zwischen Stahl und Beton	91
1.3 Vorstellung des Modells	93
1.3.1 Fachwerkmodell zur Beschreibung des Verbundverhaltens	93
1.3.2 Ermittlung der Spannung und Verformung der einzelnen Stäbe	94
1.3.2.1 Stäbe 1 und 2	94
1.3.2.2 Stab 3	98
1.3.2.3 Stab 4	100
1.3.2.4 Stab 5	103
1.3.2.5 Auswirkung der Stahldehnung und der Querrisse auf das Verbundverhalten	103
1.4 Materialgesetze für die Berechnung der Verformung des Fachwerks	106
1.4.1 Stäbe mit linearem Verhalten	106
1.4.2 Stäbe mit nichtlinearem Verhalten	106
1.5 Vergleich zwischen Versuch und Modell	111
1.6 Zusammenfassung und Ausblick	114
1.7 Literatur	114
2 Verbund unter nicht ruhender Beanspruchung	116
<i>Rainer Koch und György L. Balázs</i>	
2.1 Übersicht über die durchgeführten Versuche	116
2.2 Versuchkörper und Materialien	117
2.3 Versuchseinrichtungen	118
2.4 Versuche und Ergebnisse	119
2.4.1 Vor- und Vergleichsversuche	119
2.4.2 Statische Ausziehversuche	120
2.4.3 Dauerstandversuche	121
2.4.4 Schwellversuche	121
2.4.5 Kombinierte Dauerstand-Schwellversuche	124
2.4.6 Wechselversuche	124
2.4.7 Versuche zur Resttragfähigkeit	128
2.4.8 Versuche mit Schallemissionsanalyse	130
2.5 Zusammenfassung und Ausblick	131
2.6 Literatur	132

3	Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbetontragwerken unter Betriebsbelastung	133
	<i>Thomas M. Sippel und Rolf Eligehausen</i>	
3.1	Einleitung	133
3.2	Allgemeines	133
3.3	Rechenmodell und Materialmodelle	135
3.3.1	Allgemeines	135
3.3.2	Verhalten des Betons unter nicht ruhender Beanspruchung	135
3.3.3	Verbund zwischen Stahl und Beton	137
3.4	Vergleich zwischen Versuchen und Rechnung	140
3.5	Parameterstudien	143
3.6	Vereinfachtes Rechenmodell	147
3.7	Zusammenfassung	148
3.8	Literatur	149
4	Verbundverhalten von Spanngliedern mit nachträglichem Verbund unter Betriebsbedingungen	150
	<i>Josef Hegger, Norbert Will und Heiner Cordes</i>	
4.1	Einführung	150
4.2	Verbundverhalten von Spanngliedern	150
4.2.1	Verbundmechanismus von Spannstahlitzen	150
4.2.2	Bezogene Rippenfläche von Spannstahlitzen	152
4.2.3	Wirksame Verbundfläche von Litzenbündeln	152
4.3	Zeitabhängige Effekte des Verbunds	153
4.3.1	Erläuterung des zeitabhängigen Verbundverhaltens	153
4.3.2	Numerisches Berechnungsmodell zur Verbundrelaxation	153
4.4	Versuche unter statischer Langzeitbeanspruchung	155
4.4.1	Versuchsprogramm und Versuchsdurchführung	155
4.4.2	Versuchsergebnisse	156
4.5	Versuche unter dynamischer Langzeitbeanspruchung	158
4.5.1	Versuchsprogramm	158
4.5.2	Versuchsergebnisse	159
4.6	Bemessungsvorschlag für Verbundkennwerte	162
4.7	Zusammenfassung	163
4.8	Literatur	163
5	Spannungsumlagerungen in gemischt bewehrten Querschnitten	164
	<i>Josef Hegger, Heiner Cordes und Matthias Rudloff</i>	
5.1	Problemstellung und Zielsetzung	164
5.2	Spannungsumlagerungen bei gemischter Bewehrung	165
5.2.1	Spannungsverhältnisse in Spannbetonbauteilen mit nachträglichem Verbund	165
5.2.2	Analytische Beschreibung mit der Differentialgleichung des verschieblichen Verbunds	166

5.2.3	Lösungsmöglichkeiten der Differentialgleichung	166
5.3	Versuche an zentrischen Zugkörpern	167
5.3.1	Versuchskörper und Versuchsprogramm	167
5.3.2	Versuchsdurchführung	168
5.4	Versuchsergebnisse	171
5.4.1	Auswirkungen des Reißzustands	171
5.4.2	Einfluß der Spanngliedart	172
5.4.3	Einfluß des Verhältnisses Spannstahlfläche zu Betonstahlfläche	173
5.4.4	Einfluß von statischen und dynamischen Dauerlasten	174
5.4.5	Vergleich der Versuchsergebnisse von normalfestem (NC) und hochfestem Beton (HSC)	174
5.5	Ermittlung und Vergleich von Verbundkennwerten	175
5.6	Zusammenfassung	177
5.7	Literatur	178
 Teil III Bauteile		 179
<i>Karl Kordina</i>		
1	Einfluß von Längsbeanspruchungen auf den Neigungswinkel der Schubrisse	182
<i>Marek Los und Ulrich Quast</i>		
1.1	Einleitung	182
1.2	Ungerissener Zustand	183
1.3	Gerissener Zustand	185
1.4	FEM-Berechnungen	186
1.4.1	Einführung	186
1.4.2	Ausragender Fertigteilbalken	186
1.4.3	Einfeldbalken	189
1.4.4	Einfeldbalken mit vorgegebenem Schubriß	190
1.5	Zusammenfassung	192
1.6	Literatur	193
 2	 Auswirkungen des unterschiedlichen Verformungsverhaltens bei Be- und Entlastung auf die Beanspruchungen im Gebrauchszustand	 194
<i>Jochen Keysberg</i>		
2.1	Einleitung und Zielsetzung	194
2.2	Modelle für die Momenten-Verkrümmungs-Beziehung	195
2.2.1	Aus der Literatur bekannte Modelle	195
2.2.2	Neu entwickeltes Modell	196
2.3	Programm zur nichtlinearen Berechnung	198
2.4	Einfluß von Lastwechseln auf nichtlineare Berechnungen	199
2.4.1	Steifigkeitsverteilung	199
2.4.2	Lastbeanspruchungen	200
2.4.3	Kombinierte Last- und Zwangbeanspruchungen	201

2.5	Zusammenfassung	202
2.6	Literatur	202
3	3D-Analyse von Balken-Stützen-Verbindungen aus normal- und hochfestem Beton unter zyklischer Beanspruchung	204
	<i>Joško Ožbolt, Yijun Li und Rolf Eligehausen</i>	
3.1	Einleitung	204
3.2	Materialmodell und FE-Diskretisierung	206
3.3	Numerische Analyse	208
3.3.1	Geometrie, Materialeigenschaften und FE-Modell	208
3.3.2	Numerische Analyse und Diskussion der Ergebnisse	209
3.3.2.1	Normalfester Beton	212
3.3.2.2	Hochfester Beton	216
3.4	Schlußfolgerungen	219
3.5	Zusammenfassung	219
3.6	Literatur	220
4	Der Einfluß von freien Schwingungen infolge dynamischer Belastung auf die Deterioration eines Bauwerks	221
	<i>Manfred Specht und Michael Kramp</i>	
4.1	Veranlassung des Forschungsvorhabens	221
4.2	Forschungsziele	222
4.3	Versuchsträger, Versuchsdurchführung und Versuchsergebnisse	222
4.3.1	Versuchsträger	222
4.3.2	Versuchsdurchführung	224
4.3.3	Versuchsergebnisse	224
4.4	Auswertung	226
4.4.1	Biegesteifigkeit	226
4.4.2	Logarithmisches Dekrement	228
4.4.3	Phasendiagramme und Hysteresekurven	230
4.5	Ergebnisse für die Systemidentifikation von Stahlbetonkonstruktionen	230
4.6	Literatur	233
5	Lokale Schwind- und Temperaturgradienten in bewehrten, oberflächennahen Zonen von Betonkonstruktionen	234
	<i>Josef Eibl und Stephan Kranz</i>	
5.1	Problemstellung	234
5.2	Temperatur- und Feuchtefeldberechnung	235
5.3	Numerisches Berechnungsmodell zur Spannungsanalyse im Beton	236
5.4	Durchgeführte Versuche	238
5.4.1	Freie Schwindverformungen	238
5.4.2	Zwangsspannungen aus behinderten Schwindverformungen	239
5.4.3	Thermoschock (Bauteilversuch)	241

5.5	Rechnerische Untersuchungen	242
5.6	Zusammenfassung	245
5.7	Literatur	246
6	Wassereindringverhalten von Flüssigkeiten beim Biegeriß	247
	<i>Gert König und Christian Brunsch</i>	
6.1	Problemstellung	247
6.2	Experimentelle Untersuchungen	248
6.2.1	Vorüberlegungen zur Versuchsreihe	248
6.2.2	Versuchsvorbereitungen	248
6.2.2.1	Versuchsaufsatz	248
6.2.3	Versuchsdurchführung	249
6.2.4	Versuchsauswertung	250
6.2.4.1	Berechnungen	250
6.2.4.2	Versuchsergebnisse	250
6.3	Entwicklung eines Modells zur rechnerischen Abschätzung des zeitlichen Eindringens einer Wassermenge in Biegerisse von Stahlbetonbauteilen	251
6.3.1	Zeitunabhängiges Wasservolumen V_0	252
6.3.1.1	Anteil aus Rißfüllung $V_{\text{Riß}}$	252
6.3.1.2	Anteil aus Verdichtungsporenfüllung V_{Luft}	253
6.3.2	Zeitabhängiges Wasservolumen V_t	254
6.3.2.1	Rechenmodell für den Fließbehinderungsfaktor K_a	255
6.4	Zusammenfassung und Diskussion der Versuchsreihe	257
6.5	Literatur	258
7	Dauerhaftigkeitsprobleme von offenen Becken	259
	<i>György Iványi, Wilhelm Buschmeyer und Udo Paas</i>	
7.1	Einleitung	259
7.2	Bestandsaufnahme	260
7.2.1	Übersicht	260
7.2.2	Schäden im Bereich der Wandkronen	260
7.3	Felduntersuchungen	261
7.3.1	Meßprogramm	261
7.3.2	Meßergebnisse	261
7.4	Laboruntersuchungen	263
7.4.1	Probenahmen	263
7.4.2	Ergebnisse	264
7.4.3	Frost-Tau-bedingte Spannungen im Inneren des Betongefüges	264
7.5	Berechnungen	266
7.5.1	Temperatur- und Spannungsverlauf in Beckenwänden	266
7.5.2	Vorspannung der Beckenkronen von Rundklärbecken	268
7.6	Entwurfs- und Ausführungskriterien	270
7.6.1	Allgemeines	270
7.6.2	Entwurfsgrundsätze	270

7.6.2.1	Formgebung, Geometrie	270
7.6.2.2	Auslegung	271
7.6.2.3	Beton	271
7.6.3	Ausführungsgrundsätze	271
7.7	Literatur	272
 Teil IV Korrosion und Ermüdung		 273
	<i>Peter Schießl</i>	
1	Ermüdungskorrosion von Spannstahl	275
	<i>Herbert Kupfer und Hans H. Müller</i>	
1.1	Forschungsziel	275
1.2	Korrosionsversuche an Spannstählen	275
1.2.1	Versuchsmaterial	275
1.2.2	Versuchsmethode	276
1.2.3	Ergebnisse der Spannungskorrosionsversuche	277
1.3	Methoden zur Erkennung von Anrissen	280
1.3.1	Prinzip der angewendeten Magnetfeldmessung	280
1.3.2	Ergebnisse der Magnetfeldmessungen	281
2	Korrosionsermüdung von Stahl in Betonbauteilen	282
	<i>J. W. Weber, Peter Schießl und Jörg Moersch</i>	
2.1	Allgemeines	282
2.2	Wesentliche Einflüsse bei der Schwingungsrißkorrosion	282
2.3	Ziel der Untersuchungen	283
2.4	Prüfkörper und Betone	284
2.5	Chloridbeaufschlagung	284
2.6	Ergebnisse	284
2.7	Zusammenfassung	290
2.8	Literatur	290
3	Untersuchungen zum Rißkorrosionsverhalten von Spannstählen unter Betriebsbedingungen	291
	<i>Jörg Moersch und Peter Schießl</i>	
3.1	Einführung und Ziel	291
3.2	Untersuchungsprogramm	292
3.3	Ergebnisse	293
3.4	Zusammenfassung der Ergebnisse	295
3.5	Literatur	296
4	Schwingfestigkeit von Stahlbeton bei Beanspruchung mit Meerwasser	297
	<i>Ulf Nürnberger und Willibald Beul</i>	
4.1	Einführung	297
4.2	Mechanismus	298

4.3	Schwingfestigkeitsuntersuchungen	299
4.4	Folgerungen	302
4.5	Literatur	303
5	Wasserstoffinduzierte Spannungsrißkorrosion von zugschwellbeanspruchten Spannstählen	304
	<i>Ulf Nürnberger und Willibald Beul</i>	
5.1	Einführung	304
5.2	Untersuchungen	305
5.3	Folgerung	309
5.4	Literatur	309
6	Selbsteilung und Bewehrungskorrosion bei von schwach sauren Wässern durchströmten Trennrissen in bewehrtem Beton	310
	<i>Wieland Ramm und Michaela Bischof</i>	
6.1	Übersicht	310
6.2	Einleitung	310
6.3	Versuchsprogramm	311
6.4	Versuchsergebnisse	313
6.4.1	Versuchsergebnisse zur Selbsteilung	313
6.4.2	Versuchsergebnisse zur Korrosion	315
6.5	Zusammenfassung	320
6.6	Literatur	321
7	Untersuchungen zur Reibermüdung bei teilweise vorgespannten Bauteilen	322
	<i>Heiner Cordes, Josef Hegger und Jens U. Neuser</i>	
7.1	Einleitung	322
7.2	Stand der Forschung	323
7.2.1	Wirkungsweise der Reibermüdung	323
7.3	Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung	324
7.3.1	Versuchsaufbau	324
7.3.2	Versuchsprogramm	326
7.3.3	Meßwerterfassung und Meßprogramm	327
7.4	Versuchsergebnisse	328
7.4.1	Dichtheit und Dauerfestigkeit der Hüllrohre	328
7.4.2	Ermüdungsfestigkeit der Spannstähle	329
7.4.2.1	Bruchbild	329
7.4.2.2	Lage des Spannstahlbruchs	330
7.4.2.3	Ertragbare Lastspielzahl	330
7.4.2.4	Bemessungsvorschlag	331
7.4.3	Verbundverhalten von Kunststoffhüllrohren	333
7.5	Zusammenfassung und Ausblick	334
7.6	Literatur	334

Teil V	Junger Beton	337
	<i>Ferdinand S. Rostásy</i>	
1	Ermittlung und Berechnung des Nullspannungstemperaturgradienten im jungen Beton	339
	<i>Rupert Springenschmid und Jean-Louis Bostvironnois</i>	
1.1	Einleitung	339
1.2	Der Nullspannungstemperaturgradient	340
1.2.1	Ermittlung der Nullspannungstemperatur im Reißrahmen	342
1.2.2	Modell zur kontinuierlichen Ermittlung der Nullspannungstemperatur	343
1.2.3	Überprüfung des Rechenmodells	345
1.3	Ergebnisse und Schlußfolgerungen	345
1.4	Literatur	346
2	Experimentelle Ermittlung der Verformungskennwerte von jungem Beton und der Zwangspannungen in situ	347
	<i>Markus Plannerer und Rupert Springenschmid</i>	
2.1	Einleitung	347
2.2	Versuche zur Ermittlung der Verformungskennwerte und der Zwangspannungen	348
2.2.1	Betonausgangsstoffe, -zusammensetzung und -herstellung	348
2.2.2	Stressmeter (in situ)	349
2.3	Laborergebnisse	350
2.3.1	Entwicklung des Elastizitätsmoduls in den ersten Stunden und Tagen	353
2.3.2	Relaxationsverhalten des jungen Betons	353
2.3.3	Formänderungen bzw. Zwangspannungen infolge chemischen Schwindens und Quellens	355
2.3.3.1	Einfluß der Erhärtungstemperatur	355
2.3.3.2	Einfluß des w/z -Wertes und von Silikastaub auf das chemische Schwinden	355
2.4	In-situ-Ergebnisse	357
2.5	Zusammenfassung	359
2.6	Literatur	360
3	Werkstoffeigenschaften jungen Betons – Experimente und Modellierung	361
	<i>Ferdinand S. Rostásy und Alex-W. Gutsch</i>	
3.1	Einleitung	361
3.2	Versuche und Modellbildung	362
3.2.1	Betonzusammensetzungen	362
3.2.2	Adiabatische Temperaturerhöhung	362
3.2.3	Entwicklung der mechanischen Kurzzeiteigenschaften	364
3.2.4	Entwicklung und Ausbreitung der Mikrorisse bei Zugbeanspruchung	366
3.2.5	Viskoelastisches Verhalten unter Zugspannung	368
3.3	Zusammenfassung	373
3.4	Literatur	373