Inhaltsverzeichnis

I Erhalt unserer Bausubstanz 1
Peter Mark, Pia Neugebauer

1 Einleitung 3
2 Einführung und Pressestimmen 3
3 Zustand und Eigenschaften unserer Brücken 3
4 Erhaltungskreislauf 8
5 Ansätze der Forschung, Bewertung und Nachrechnung von Bestandsbrücken 11
5.1 Monitoring 11
5.2 Nachrechnung 13
5.3 Verstärkung mit externer Vorspannung 15
5.4 Lebensdaueranalysen und Optimierung 16
6 Schlussfolgerungen 20
7 Danksagung 21
8 Literatur 21

II Tragwerksplanung im Bestand – Bewertung bestehender Tragwerke 25
Frank Fingerloos, Steffen Marx, Jürgen Schnell

1 Einleitung 27
2 Bestandsschutz 27
2.1 Grundlagen 27
2.2 Umsetzung 28
2.3 Zusammenfassung 31
3 Besonderheiten bei der Bewertung bestehender Tragwerke 31
3.1 Allgemeines 31
3.2 Bestandsaufnahme und Bestandsbewertung 32
3.2.1 Vorgehensweise 32
3.2.2 Durchzuführende Untersuchungen . . . 33
3.3 Berücksichtigung baubetrieblicher Abläufe 35
3.4 Nachrechnung und Konstruktion 39
3.5 Historische Bewehrungsregeln 42
3.5.1 Einleitung 42
3.5.2 Eigenschaften historischer Betonstähle 43
3.5.3 Mindestbetondeckung 46
3.5.4 Stababstände von Betonstählen 48
3.5.5 Biegerollendurchmesser 50
3.5.6 Verankerung zugbeanspruchter Längsbewehrung 51
3.5.6.1 Verankerung zugbeanspruchter glatter Betonstähle 51
3.5.6.2 Verankerung zugbeanspruchter gerippter Betonstähle 53
3.5.6.3 Verbundspannungen 54
3.5.7 Übergreifungsstöße zugbeanspruchter Längsbewehrung 55
3.5.7.1 Übergreifungsstöße zugbeanspruchter glatter Betonstähle 55
3.5.7.2 Übergreifungsstöße zugbeanspruchter gerippter Betonstähle 57
4 Historische Normen und Zulassungen des Beton- und Stahlbetonbaus 60
5 Ermittlung der maßgebenden Materialkennwerte bestehender Tragwerke . . . 63
5.1 Materialkennwerte auf Basis vorliegender Planungsdokumente 63
5.1.1 Beton 63
5.1.2 Betonstahl 65
5.2 Materialkennwerte aus Werkstoffuntersuchungen 69
5.2.1 Beton 69
5.2.2 Betonstahl 71
6 Modifizierte Teilsicherheitsbeiwerte für Bestandsbauten 71
6.1 Allgemeines 71
6.2 Modifikation von Teilsicherheitsbeiwerten 72
6.3 Beispiel: Nachweis Büro-/ Wohnhausdeckenplatte 75
6.3.1 Aufgabenstellung 75
6.3.2 Vorhandene Bemessung nach DIN 1045:1972-01 76

6.3.3 Nachweis nach DIN EN 1992-1-1:2011-01 mit Lasterhöhung 77
6.3.4 Nachweis mit modifizierten Teilsicherheitsbeiwerten 78
6.3.5 Vergleich der Ergebnisse 81

7 Ermittlung der Tragfähigkeit auf der Grundlage von Belastungsversuchen 81
7.1 Entwicklung und normative Grundlagen 81
7.2 Einordnung in die Bestandsbewertung 83
7.3 Grundlagen und Anwendungsbereiche 84
7.4 Planung von Belastungsversuchen . . . 86
7.5 Versuchsdurchführung und Auswertung 88
7.6 Schlussfolgerungen 90

8 Abschätzung der Feuerwiderstandsdauer historischer Betonkonstruktionen 91
8.1 Allgemeines 91
8.2 Baustoffe 94
8.2.1 Beton 94
8.2.2 Betonstahl 95
8.2.3 Putze 97
8.2.4 Baustoffklassen 97
8.3 Bauteile 97
8.3.1 Stahlbetondecken 97
8.3.2 Stahlsteindecken 98
8.3.3 Kappendecken 98
8.3.4 Glasstahlbeton 98
8.3.5 Balken 99
8.3.6 Stützen 99

9 Übersicht historischer Bestimmungen für den Beton- und Stahlbetonbau – Bemessung, Ausführung, Beton, Betonstahl 100
9.1 Die frühen Bestimmungen bis 1925 . 100
9.2 DIN-Normen 1925 bis 2004 100
9.3 TGL-Standards 1960 bis 1990 104
9.4 Die Richtlinien des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton 1930 bis 2004 106

10 Literatur 107

III Instandsetzung von Tiefgaragen und Parkhäusern 115

Christian Sodeikat, Till F. Mayer

1 Einleitung 117

2 Bauliche Situation älterer Tiefgaragen und Parkhäuser 117

3 Rechtliche Grundlagen bei Instandsetzungen von Parkbauten . . 120
3.1 Einführung 120
3.2 Die anerkannten Regeln der Technik (aRdT) 120
3.3 Verwendbarkeit von Baustoffen 121
3.4 Regelwerke für Instandsetzungen: Instandsetzungs-Richtlinie (Rili-SIB 2001) und DIN EN 1504 . . 122
3.5 Weitere Regelwerke für Instandsetzungen 123
3.6 Beratungs- und Aufklärungspflicht der Planer gegenüber dem Bauherrn . 123

4 Bewehrungskorrosion 124
4.1 Allgemeines 124
4.2 Korrosion von Stahl allgemein 124
4.3 Korrosion von Stahl in Beton 125
4.4 Carbonatisierungsinduzierte Bewehrungskorrosion 127
4.5 Chloridinduzierte Bewehrungskorrosion 128
4.6 Kritischer korrosionsauslösender Chloridgehalt C_{Krit} 129
4.7 Korrosion im Rissbereich 131
4.7.1 Allgemeines 131
4.7.2 Einleitungsphase im Bereich von Rissen 132
4.7.3 Schädigungsphase im Bereich von Rissen 132
4.7.4 Korrosionsfortschritt nach Verschließen der Risse 133

5 Instandsetzung nach der Instandsetzungs-Richtlinie – Vorgehen und technische Grundlagen 134
5.1 Grundlagen 134
5.2 Instandsetzungsprinzipien 134
5.2.1 Allgemeines 134
5.2.2 Instandsetzungsprinzipien bei carbonatisierungsinduzierter Korrosion . . 135
5.2.3 Instandsetzungsprinzipien bei chloridinduzierter Korrosion 138
5.3 Umsetzung von Instandsetzungen nach der Instandsetzungs-Richtlinie . 138

6 Istzustandsfeststellung von Parkbauten – Durchführung erforderlicher Untersuchungen 139
6.1 Aufnahme der grundsätzlichen Bauwerkssituation 139
6.2 Tragkonstruktion 139
6.3 Auffinden von Bereichen mit chloridinduzierter Korrosion(sgefahr) 142
6.3.1 Aufgabenstellung 142
6.3.2 Visuelle Untersuchung 142
6.3.3 Bestimmung des Ausmaßes von Bewehrungskorrosion bzw. vorhandener Querschnittsschwächung 143
6.3.4 Bestimmung des Chloridgehalts 143
6.3.5 Elektrochemische Potentialfeldmessung 145
6.3.6 Bestimmung der Betondeckung 148
6.4 Weitere zerstörungsfreie Untersuchungen 149

7 Bestandsschutz – Festlegung des Sollzustands 153

8 Instandsetzungsplanung 157
8.1 Allgemeines 157
8.2 Notwendiger Instandsetzungsumfang bei chloridbeaufschlagten Bauteilen . 157
8.3 Instandsetzungsbetone und -mörtel . 161
8.3.1 Allgemeines 161
8.3.2 Beton nach EC2 und DIN EN 206-1/DIN 1045-2 161
8.3.3 Spritzbeton nach DIN 18551 bzw. DIN EN 14487 161
8.3.4 Kunststoffmodifizierter Instandsetzungsbeton und -mörtel (PCC) ... 161
8.3.5 Kunststoffmodifizierter Spritzbeton und -mörtel (SPCC) 162
8.3.6 Reaktionsharzgebundener Instandsetzungsbeton und -mörtel (PC) 162
8.3.7 Vergussbeton 162

9 DBV-Merkblatt „Parkhäuser und Tiefgaragen“ 163
9.1 Einführung 163
9.2 Diskussion der Ausführungsvarianten nach DBV-Merkblatt „Parkhäuser und Tiefgaragen“ 165

10 Instandsetzungsdetails bei Parkbauten 167
10.1 Einführung 167
10.2 Betonabtrag – Technologie und Umfang 167
10.2.1 Technologie 167
10.2.2 Umfang des erforderlichen Betonabtrags 168
10.3 Schutzmaßnahmen für befahrene Flächen 170
10.3.1 Randbedingungen 170
10.3.2 Zwischendecks 170
10.3.3 Freidecks 170
10.3.4 Rampen 171
10.3.5 Bodenplatten 171
10.4 Schutzmaßnahmen für aufgehende Bauteile über und unter Belagoberkante 171
10.5 Gefälle, Entwässerungseinrichtungen 174

11 Wartung, Instandhaltung und Überwachung 174
11.1 Wartung und Instandhaltung 174
11.2 Wartungsplan 175
11.3 Überprüfung des Instandsetzungserfolgs durch Monitoring 176
11.3.1 Anwendungsgebiete 176
11.3.2 Korrosionsmonitoring 178
11.3.3 Feuchtemonitoring 179

12 Literatur 180

IV Erhaltung und Instandsetzung von massiven Verkehrswasserbauwerken ... 185
Andreas Westendarp, Holger Becker, Jörg Bödefeld, Helmut Fleischer, Claus Kunz, Matthias Maisner, Hilmar Müller, Amir Rahimi, Thorsten Reschke, Frank Spörel

1 Einführung 187

2 Regelwerksituation 188

3 Bauwerke, Bauwerkszustand 190
3.1 Bauwerke, Bauweisen, Baustoffe ... 190
3.2 Verfahren für die Zustandsbeurteilung und Prognose 193
3.2.1 Bauwerksinspektion, EMS 193
3.2.2 Bauwerksbegutachtung 193
3.2.2.1 Allgemeines 193
3.2.2.2 Ablauf, Vorgehensweise 194
3.3 Bauwerkssituation 202
3.3.1 Ergebnisse aus der Bauwerksinspektion 202
3.3.2 Dauerhaftigkeitsprobleme 204
3.3.3 Standsicherheitsprobleme 206

4 Planungsgrundlagen, Instandsetzungskonzepte 210
4.1 Allgemeines 210
4.2 Umgang mit Dauerhaftigkeitsproblemen 210
4.2.1 Allgemeines 210

4.2.2 Dauerhaftigkeitsrelevante Einwirkungen auf Verkehrswasserbauwerke 210
4.2.3 Klassifizierung des Betonuntergrunds 211
4.2.4 Instandsetzungssysteme, Dauerhaftigkeit, Verbund 213
4.2.5 Erreichen der Instandsetzungsziele, Prinzipien und Verfahren für die Instandsetzung 214
4.2.6 Wasserbauspezifische Planungsgrundsätze 215
4.3 Umgang mit Standsicherheitsproblemen 216

5 Instandsetzungsverfahren gemäß ZTV-W LB 219 220
5.1 Untergrundvorbehandlung 220
5.1.1 Ziel und Umfang der Untergrundvorbehandlung 220
5.1.2 Verfahren 220
5.1.3 Eigenschaften und Anforderungen . . 222
5.1.4 Entsorgung 222
5.2 Beton/Spritzbeton (verankert, bewehrt) 222
5.2.1 Allgemeines 222
5.2.2 Bemessung von Vorsatzschalen 223
5.2.3 Baustoffanforderungen 224
5.2.4 Ausführung 225
5.2.5 Qualitätssicherung 226
5.3 Spritzmörtel/Spritzbeton (unverankert, unbewehrt) 227
5.3.1 Allgemeines 227
5.3.2 Anforderungen und Eignungsnachweise gemäß BAW-MSM 227
5.3.3 Qualitätssicherung 229
5.4 Injektion massiger Betonbauteile mit hydraulischen Bindemitteln 229
5.4.1 Anwendungsbereich des Verfahrens . 229
5.4.2 Voruntersuchungen zur Bewertung der Injizierbarkeit 230
5.4.3 Injektionsdurchführung und Injektionsversuch 231
5.4.4 Bewertung Injektionserfolg 232

6 Offene Fragen, Entwicklungen 232
6.1 Instandsetzung mit textilbewehrten Spritzmörteln 232
6.2 Instandsetzung von Bewegungsfugen 234
6.2.1 Problemstellung 234
6.2.2 Fugeninstandsetzungsvarianten 234
6.2.2.1 Aufgesetzte Fugenbänder 234
6.2.2.2 Aufgesetzte Omega-Fugenbänder mit Gewebeverstärkung 236
6.2.2.3 Stahlseilbewehrtes Klemmfugenband (SBK) 236
6.2.2.4 Mörtelgefüllter Elastomer-Schlauch . 239
6.2.2.5 Injektionen von Bewegungsfugen . . . 239
6.2.3 Fazit und Ausblick 239
6.3 Instandsetzung unter Betrieb 240

7 Literatur 243

V Kathodischer Korrosionsschutz im Stahlbetonbau 247
Thorsten Eichler, Susanne Gieler-Breßmer

1 Allgemeines 249

2 Grundlagen 250
2.1 Korrosion von Stahl in Beton 251
2.1.1 Flächige Korrosion durch Karbonatisierung 251
2.1.2 Lochkorrosion in Anwesenheit von Chloriden 253
2.2 Galvanischer Schutz 256
2.3 Fremdstromschutz 257

3 Anodenmaterialien und -typen 261
3.1 Galvanische Anoden 261
3.2 Inertanoden (Dimensionsstabile Anoden – DSA) 263
3.3 Leitfähige Beschichtungen auf Kohlenstoffbasis 264
3.4 Anodeneinbettung 264

4 Schutzkriterien und technische Regelwerke 268
4.1 DIN EN ISO 12696 268
4.2 DIN EN 15257 zur Zertifizierung von Fachpersonal für den kathodischen Korrosionsschutz 269
4.3 Kathodischer Korrosionsschutz von Spannbetonbauwerken 270

5 Ausführungsbeispiele 271
5.1 Parkhäuser und Tiefgaragen 271
5.1.1 Cityparkhaus in Offenbach 272
5.1.2 Präventiver kathodischer Korrosionsschutz in einer Tiefgarage 276
5.1.3 Kathodischer Korrosionsschutz hochbelasteter Stützen in einer Tiefgarage 278
5.2 Brückenbauwerke 280

6 Zusammenfassung 283

7 Literatur 284

VI Bewertung der Leistungsfähigkeit von Instandsetzungsmaterialien und der Lebensdauer von instand gesetzten Stahlbetonbauteilen unter Chlorideinwirkung 287
Christoph Gehlen, Amir Rahimi, Thorsten Reschke, Andreas Westendarp

1 Einleitung 289

2 Lebensdauerbemessung von (neuen) Stahlbetonbauteilen 290
2.1 Grundlagen 290
2.2 Mathematische Modellierung des Chloridtransports 290
2.3 Bemessung 294

3 Chlorideindringwiderstand von Instandsetzungsmaterialien 297
3.1 Allgemeines 297
3.2 Laboruntersuchungen 297
3.2.1 Materialien, Probekörper, Versuche 297
3.2.2 Kennwerte und Zusammenhänge . . . 298
3.2.3 Bewertung der Leistungsfähigkeit der Instandsetzungsmaterialien 302

4 Lebensdauerbemessung von instand gesetzten Stahlbetonbauteilen 304
4.1 Allgemeines 304
4.2 Modellierung des Chloridtransports in einem 2-Schicht-System 305
4.3 Numerische Untersuchungen zum Chloridtransport in einem 2-Schicht-System 306
4.4 Laborversuche zum Chloridtransport in einem 2-Schicht-System 307
4.5 Auslagerungsversuche zum Chloridtransport in einem 2-Schicht-System 310
4.6 Zustandsprognose nach einer Instandsetzung 310

5 Zusammenfassung 312

6 Literatur 312

VII Innovative Monitoringstrategien für Bestandsbauwerke 315
Konrad Bergmeister, Peter Mark, Michael Österreicher, David Sanio, Peter Heek, Alexander Krawtschuk, Alfred Strauss, Mark Alexander Ahrens

1 Einleitung 317

2 Zerstörungsfreie Untersuchungsmethoden 318
2.1 Schallemissionsverfahren 318
2.2 Impuls-Echoverfahren 318
2.3 Radar- bzw. Georadarverfahren 319
2.4 Ultraschallverfahren 321
2.5 Infrarotverfahren 322
2.6 Elektromagnetische Verfahren 322
2.7 Laservibrometer 322
2.8 Wegaufnehmer 323
2.8.1 Kapazitive Wegaufnehmer 323
2.8.2 Induktive Wegaufnehmer 323
2.9 Optische Messsysteme 324

3 Monitoringmethoden und Grundlagen der Bewertung 325
3.1 Warum Monitoring? 325
3.2 Monitoringmethoden – Aktueller Wissenstand 325
3.3 Planung und statistische Bearbeitung von Bauteilprüfungen . . 326
3.3.1 David-Hartley-Pearson-Test 328
3.3.2 Grubbs-Test 328
3.4 Festlegung der Bemessungswerte . . . 328
3.4.1 Bestimmung der Bemessungswerte auf Basis der charakteristischen Werte 329
3.4.2 Direkte Bestimmung der Bemessungswerte 330
3.4.3 Bestimmung der Bemessungswerte auf Basis probabilistischer Bewertung von Stichproben 330

4 Grundelemente einer holistischen Lebenszyklusbetrachtung 332
4.1 Probabilistisch basierte Bewertung . . 333
4.2 Holistisch basierte Lebenszyklusbewertung 334

5 Dynamische Monitoringverfahren – Grundlagen 335
5.1 Allgemeines 335
5.2 Schwingungslehre 336
5.2.1 Allgemeine Einführung 336
5.2.2 Gliederung der Schwingungen 336
5.2.3 Der lineare Einmassenschwinger . . . 337
5.2.3.1 Allgemeine Definition 337
5.2.3.2 Freie Schwingung des ungedämpften Einmassenschwingers 337
5.2.3.3 Freie Schwingung des gedämpften Einmassenschwingers 338

5.2.3.4 Harmonische Anregung des ungedämpften Einmassenschwingers 339
5.2.3.5 Harmonische Anregung des gedämpften Einmassenschwingers . . 339
5.2.4 Der lineare Mehrmassenschwinger . . 340
5.2.4.1 Allgemeine Definition 340
5.2.4.2 Freie Schwingung des linearen Mehrmassenschwingers 341
5.2.4.3 Erzwungene Schwingung des linearen Mehrmassenschwingers . . . 342
5.2.5 Modalanalyse 342
5.2.6 Dämpfung 344
5.2.6.1 Allgemeines 344
5.2.6.2 Definition der Dämpfung 345
5.2.6.3 Dämpfungszahlen in der Praxis 345
5.3 Grundlagen der Signalverarbeitung . 346
5.3.1 Analoge – Digitale Signale 346
5.3.2 Grundsätzliche Einteilung von Signalen 346
5.3.3 Digitale Signalverarbeitung 347
5.3.3.1 Allgemeines 347
5.3.3.2 Zeitdiskretisierung 347
5.3.3.3 Abtasttheorem 347
5.3.3.4 Quantisierungsrauschen 348
5.4 Methoden der Signalanalyse – Frequenzanalyse 349
5.4.1 Einleitung 349
5.4.2 Fourierreihe 349
5.4.3 Fourierintegral 350
5.4.4 Diskrete Fouriertransformation 350
5.4.5 „Schnelle“ Fouriertransformation – FFT 352
5.5 Numerische Integration 353
5.5.1 Allgemeines 353
5.5.1.1 Theoretische Grundlagen 353
5.5.1.2 Rechteckregel zur numerischen Integration 354
5.5.1.3 Trapezregel zur numerischen Integration 355
5.5.1.4 Simpsonregel zur numerischen Integration 356
5.5.2 Zusammenfassung und Vergleich der vorgestellten numerischen Integrationsverfahren 357

6 Dynamische Monitoringverfahren – Anwendung 358
6.1 Einleitung 358
6.2 Näherungsverfahren zur automatisierten Bestimmung der Dämpfung 358
6.2.1 Experimentelle Verfahren zur Bestimmung der Dämpfung – Stand der Technik 359
6.2.1.1 Einleitung 359
6.2.1.2 Logarithmische Dekrement-Methode 359
6.2.1.3 Bandbreitenmethode zur Bestimmung der Dämpfung 360
6.2.2 Erweiterter Ansatz – Bestimmung der Dämpfung mittels Kreuzkorrelationsanalyse 361
6.2.2.1 Einleitung 361
6.2.2.2 Kreuzkorrelationsanalyse 362
6.2.2.3 Charakterisierung der Dämpfungseigenschaften auf Basis von Kreuzkorrelationsbetrachtungen 363
6.2.2.4 Praktische Anwendung des Verfahrens 367
6.3 Über die Möglichkeiten der Bestimmung der Verformung und der Modalformen von Strukturen unter Belastung 368
6.3.1 Praktische Aspekte im Zusammenhang mit der Ermittlung der Verformung aus Beschleunigungsmessungen 369
6.4 Bestimmung der Verformung auf Basis von Neigungsmessungen 371
6.4.1 Theoretische Grundlagen des Verfahrens 371
6.4.2 Praktische Aspekte im Zusammenhang mit der Ermittlung der Verformung aus Neigungsmessungen 376
6.5 Experimentelle Verifikation der Verformungen und Beschleunigungen . . 377
6.5.1 Zielsetzung der Laborstudie 377
6.5.2 Versuchsaufbau 377
6.5.3 Ergebnisse der Labormessungen 378
6.6 Feldmessungen an einer Eisenbahnbrücke der ÖBB-Strecke Wien–Gmünd 380
6.6.1 Tragwerkskurzbeschreibung 380
6.6.2 Langzeitmonitoring zur Ermittlung der Tragwerksdämpfung 380

7 Radarinterferometrie zum großflächigen Setzungsmonitoring von Bauwerken 382
7.1 Einleitung und Motivation 382
7.1.1 Einführung Radarinterferometrie . . . 383
7.1.2 Grundprinzip satellitengestützter Radarinterferometrie 385
7.1.3 Persistent-Scatterer-Interferometrie (PSI) 388
7.2 Satellitengestützte Radarinterferometrie zum Monitoring von Bestandsbebauung – Beispiel innerstädtisches Tunnelbauprojekt „Wehrhahnlinie“ in Düsseldorf 390
7.2.1 Projektbeschreibung und Setzungen aus dem Tunnelbau 390
7.2.2 Detektierte Persistent Scatterer 393
7.2.3 Mittels PSI gemessene Setzungsmulde 393

7.2.4 Gegenüberstellung terrestrischer und satellitengestützter Messwerte 395
7.2.5 Schlussfolgerungen 397
7.3 Ausblick auf satellitengestütztes Monitoring an Bestandsbrücken 398

8 Monitoring einer Spannbeton-Hohlkastenbrücke 399
8.1 Einleitung und Motivation 399
8.2 Referenzbauwerk: Hochstraße „Pariser Straße“ 400
8.3 Numerische Berechnung und Modellierung 402
8.3.1 Numerisches Modell und Modellierungsaspekte 402
8.3.2 Spannungsberechnung mit Momenten-Spannstahlspannungs-Beziehung ... 403
8.3.3 Lastmodellierung und Verkehrslastmodelle 406
8.4 Betriebsfestigkeitsnachweis 408
8.5 Monitoringprogramm für Ermüdungsprobleme 409
8.5.1 Direkte Dehnungsmessung am Spannstahl 409
8.5.2 Aufbereitung der Dehnungsmessung mit Klassier- und Zählverfahren 414
8.5.3 Langzeitige Verkehrszählungen 418
8.5.4 Materialproben 419
8.5.5 Ermittlung der Wöhlerlinie 423
8.5.6 Probebelastung zur Modellkalibrierung 424
8.5.7 Zeitabhängige Verluste 426
8.5.8 Temperaturmessung 429
8.6 Genauigkeitssteigerung von Lebensdauerprognosen durch Monitoring 433

9 Zerstörungsfreie Überprüfungen und Lebensdauerbewertung einer Bogenbrücke 435
9.1 Zerstörungsfreie Untersuchungen ... 435
9.1.1 Georadarmessungen 435
9.1.2 Laservibrometermessungen 438
9.1.3 Wegaufnehmermessungen 440
9.1.4 Erkenntnisse aus den Monitoringkampagnen der einzelnen Bogentragwerke 442
9.2 Strukturmodellierung 442
9.2.1 Baustoffmechanische Grundlagen .. 443
9.2.2 Belastungen 445
9.2.3 Vergleich Messdaten – Modellergebnisse 445
9.2.4 Ermittlung der Stützlinie mittels Monitoringdaten 448
9.3 Erkenntnisse 450

10 Zusammenfassung und Ausblick ... 450

11 Literatur 452

VIII Baudynamik 461
Claudia Westerkamp-Freitag, Johann-Dietrich Wörner

1 Einleitung 463

2 Begriffe, Einheiten und Bezeichnung 463

3 Theoretische Grundlagen 464
3.1 Systeme mit einem Freiheitsgrad ... 464
3.1.1 Freie lineare Schwingungen 464
3.1.1.1 Ungedämpfte Schwingung 464
3.1.1.2 Gedämpfte Schwingung 466
3.1.2 Erzwungene lineare Schwingungen . 468
3.1.3 Nichtlineares Verhalten 473
3.2 Systeme mit mehreren Freiheitsgraden 475
3.2.1 Allgemeines 475
3.2.2 Diskrete Systeme 475
3.2.2.1 Freie lineare Schwingungen 475
3.2.2.2 Erzwungene lineare Schwingungen . 479
3.2.2.3 Nichtlineares Verhalten 483
3.2.3 Kontinuierliche Systeme 483

4 Experimentelle Untersuchungen 484
4.1 Untersuchungsverfahren 484
4.1.1 Labor 484
4.1.2 Vor Ort 485

5 Anwendungen 485
5.1 Einwirkungen 485
5.1.1 Allgemeines 485
5.1.2 Lasteinwirkungen 485
5.1.3 Verschiebungseinwirkungen 488
5.2 Nachweise 489
5.2.1 Sicherheitskonzept 489
5.2.2 Tragfähigkeit 489
5.2.3 Gebrauchstauglichkeit (inkl. Komfort) 490
5.3 Schwingungsreduktion 490
5.3.1 Allgemeines 490
5.3.2 Passive Systeme 490
5.3.3 Aktive Systeme 491
5.3.4 Schwingungsisolation 491

6 Weiterführende Literatur 491

IX Maschinenfundamente 495
Hans-Werner Nordhues

1 Einleitung 497

2 Maschinenarten 497
2.1 Werkzeugmaschinen 497
2.1.1 Allgemeines 497
2.1.2 Kleine Bearbeitungszentren 497
2.1.3 Umformmaschinen 498
2.1.4 Feinbearbeitungsmaschinen 498
2.1.5 Große Werkzeugmaschinen 498
2.2 Messmaschinen 499
2.3 Prüfstände 499
2.4 Aufstellelemente 499

3 Statische Auslegung von Fundamenten 499
3.1 Allgemeines 499
3.2 Baugrund 501
3.3 Lastabtragung 501
3.4 Verformungsnachweise von Maschinenfundamenten 502
3.5 Spannungen aus Hydratation 505
3.5.1 Allgemeines 505
3.5.2 Zustand 1 (T = 24 h) 507
3.5.3 Zustand 2 (T = 3 Tage) 507
3.5.4 Zustand 3 (T = 28 Tage) 507
3.6 Mindestbewehrung 507
3.7 Wasserrechtliche Anforderungen an Fundamente 508
3.7.1 Allgemeines 508
3.7.2 Beton nach BUmwS-Richtlinie 509
3.7.2.1 Allgemeines 509
3.7.2.2 Dichtheitsnachweise 510
3.7.3 Beschichtungen 511
3.7.4 Auskleidungen mit Stahl 512
3.7.5 Kunststoffbahnen 512

4 Dynamische Auslegung von Fundamenten 512
4.1 Allgemeines 512
4.2 Schutz von Menschen in Gebäuden . 515
4.3 Schutz von baulichen Anlagen 517

5 Konstruktion von Fundamenten 517
5.1 Allgemeines 517
5.2 Betonsorten 517
5.3 Bewehrungsführung 518
5.4 Einbauteile 518
5.5 Fixatoren und Verankerungen 519

6 Beurteilung von Fundamenten 521
6.1 Temperaturkontrollen 521
6.2 Verformungsmessungen 521

7 Literatur 524

X Feste Fahrbahn in Betonbauweise 529
Stephan Freudenstein, Konstantin Geisler, Tristan Mölter, Michael Mißler, Christian Stolz

1 Einleitung – Stand der Technik 531
1.1 Vorbemerkungen 531
1.2 Vergleich Schotteroberbau – Feste Fahrbahn 531
1.3 Grundsätzliche Bauarten der FF in Deutschland – Stand der Technik . . . 533
1.3.1 Entwicklung in Deutschland 533
1.3.2 Gleisrost auf durchgehend bewehrter Gleistragplatte 534
1.3.3 Durchgehend bewehrte Gleistragplatte mit Einzelstützpunkten 535
1.3.4 Fertigteilplatten 535
1.3.5 Spezielle Systeme für Tunnel/Brücken 536
1.3.6 Weiterentwicklungen 536
1.3.7 Resümee 537
1.4 FF-Systeme/Entwicklungen im Ausland (Beispiele) 537

2 Bemessung und Konstruktion 540
2.1 Grundsätzliches 540
2.1.1 Regelwerke 540
2.1.2 Grundsätzliche Belastungsansätze . . 540
2.2 Werkstoffkennwerte – Annahmen . . . 541
2.2.1 Untergrund 541
2.2.2 Ungebundene Tragschicht 542
2.2.3 Tragschicht mit hydraulischen Bindemitteln (THB) 542
2.2.4 Gleistragplatte 544
2.3 Berechnung 544
2.3.1 Allgemeines 544
2.3.2 Berechnung der Einzelstützpunktkräfte 545
2.3.3 Biegespannungsberechnung am System mit aufgelagertem Gleisrost . 546
2.3.4 System mit Einzelstützpunkten 549
2.3.5 Beispielrechnung 550

2.4 Weitere Betrachtungen 552
2.4.1 Zwischenschichten 552
2.4.2 Temperatureinfluss 552
2.4.3 Finite-Elemente-Methode (FEM) . . . 553

3 Entwicklung einer Festen Fahrbahn 554
3.1 Allgemeines 554
3.2 Laborprüfungen 555
3.2.1 Schienenbefestigungsprüfung 555
3.2.2 Prüfung elastischer Komponenten . . 555
3.2.3 Spannklemmenprüfung 556
3.3 Lateralkräftenachweis 556

4 Feste Fahrbahn auf Brücken 557
4.1 Einführung – Historie 557
4.1.1 Anforderungen an die Feste Fahrbahn auf Brücken 557
4.1.2 Systemfindung 557
4.1.2.1 Geometrische Zwangspunkte 558
4.1.2.2 Akustik 559
4.1.2.3 Bemessung 559
4.1.3 Systemerprobung und Folgerungen für einen späteren Einbau 559
4.1.4 Messungen während der Systemerprobung 560
4.1.4.1 Bremsversuche 560
4.1.4.2 Akustische Eigenschaften nach Einbau der elastischen Matte 560
4.1.4.3 Einfederungen der Gleistragplatte . . 560
4.1.4.4 Resümee der Systemerprobung 560
4.1.5 Regelungen und Planungshinweise für die Ausführung der Festen Fahrbahn auf Brücken 561
4.1.6 Die Umsetzung auf Köln–Rhein/Main und Nürnberg–Ingolstadt 561
4.1.7 VDE 8 – neue Brückenbauweisen . . 561
4.2 Systeme der Festen Fahrbahn auf Brücken 562
4.2.1 Prinzip der Festen Fahrbahn auf langen Brücken 562
4.2.2 Komponenten der Festen Fahrbahn auf langen Brücken 562
4.2.2.1 Schienenstützpunkte 563
4.2.2.2 Gleistragplatte 563
4.2.2.3 Höckerplatte 565
4.2.2.4 Trennebene 565
4.2.2.5 Schutzbeton(platte) 566
4.2.3 Feste Fahrbahn auf kurzen Brücken . 566
4.2.4 Feste Fahrbahn auf langen Brücken . 567
4.2.5 Brückenbereich der Festen Fahrbahn 568
4.2.6 Endsporn 569
4.3 Der anspruchsvolle Übergangsbereich 569
4.3.1 Allgemeines 569
4.3.2 Die obere und untere Systemebene . . 569
4.3.3 Zusammenwirken von Oberbau und Brücke 570
4.3.4 Generelle Einwirkungen und Verformungen am Brückenende 570
4.3.5 Zusammenstellung der Einwirkungen 571
4.3.6 Ergänzende Regelungen zur Ausführung der Festen Fahrbahn auf Brücken und Nachweisführungen . . . 571
4.3.7 Maßnahmen zur Einhaltung der Grenzwerte 573
4.3.8 Zusammenfassung, Konsequenzen und Ausblick 574

5 Ausgewählte Themen 574
5.1 Zusätzliche Anforderungen an die Konstruktion für die Instandhaltung . 574
5.2 Weichen in Fester Fahrbahn bei der Deutschen Bahn 575
5.3 Instandhaltung der Festen Fahrbahn . 576
5.4 Inspektionen 577
5.4.1 Allgemeines 577
5.4.2 Rissbildungen und Fugenöffnungen . 577
5.4.3 Anker zur Befestigung von Schwellen 578
5.4.4 Schwellenlockerungen 578
5.4.5 Zusätzliche Inspektionen 578
5.5 Instandsetzung einer FF 578
5.5.1 Instandsetzungsfälle aus der Praxis . 578
5.5.2 Erneuerungen von Stützpunkten 579
5.5.3 Sanierung von Ankerbolzen 579
5.5.4 Sanierung von Setzungen 579
5.5.5 Schadhafte Schallabsorber 579
5.6 Entwässerung 579
5.6.1 Allgemeines 579
5.6.2 Abführung des Oberflächenwassers . 579
5.6.3 Mittenentwässerung 580
5.6.4 Gestaltung des Mittelstreifens 580
5.6.5 Seitliche Abdeckung 580
5.7 Übergänge 580
5.7.1 Allgemeines 580
5.7.2 Übergänge im Unterbau und Oberbau 580
5.7.3 Schweißungen und Isolierstöße 580
5.7.4 Übergang Brücke bzw. Tunnel zum Erdbauwerk 580
5.7.5 Übergang Feste Fahrbahn – Schotteroberbau 580
5.7.6 Übergang Feste Fahrbahn – Feste Fahrbahn 581
5.8 Befahrbarkeit der Festen Fahrbahn . . 581
5.8.1 Allgemeines 581
5.8.2 Konstruktive Gestaltung der Befahrbarkeit 581
5.8.3 Dimensionierung der Befahrbarkeit . 582

5.9 Schallabsorber 582
5.9.1 Allgemeines 582
5.9.2 Bau- und schalltechnische Anforderungen 582
5.9.3 Spezielle Anforderungen an Materialien und Konstruktion 582

6 Literatur 583

XI Einwirkungen auf Brücken nach den Eurocodes 585
Balthasar Novák, Peter Lippert

1 Allgemeines über die Eurocodes für die Bestimmung der Einwirkungen auf Brücken 587
1.1 Hintergründe der Fortschreibung der Eurocodes 587
1.2 Allgemeines zu den Eurocodes 587
1.3 Eurocodes mit Regelungen für Einwirkungen auf Brücken 587
1.4 Sicherheitskonzept der Eurocodes . . 588
1.5 DIN-Handbücher 588
1.5.1 Allgemeines 588
1.5.2 Bauen im Bestand 589

2 Erläuterungen 589
2.1 Allgemeines 589
2.2 Aufbau des DIN-Handbuches 1, Band 3 589
2.3 Einteilung der Einwirkungen 590
2.4 Einwirkungen aus Straßenverkehr . . . 591
2.4.1 Anwendungsbereich 591
2.4.2 Anzusetzende Fahrstreifen 591
2.4.3 Lastmodelle für Vertikallasten 591
2.4.3.1 Allgemeines 591
2.4.3.2 Lastmodell 1 592
2.4.3.3 Lastmodell 4 595
2.4.4 Horizontallasten 595
2.4.4.1 Lasten aus Bremsen und Anfahren . . 595
2.4.4.2 Zentrifugallasten 595
2.4.5 Mehrkomponentige Einwirkungen . . 596
2.4.6 Lastmodelle für Ermüdungsberechnungen 598
2.4.7 Außergewöhnliche Einwirkungen aus Straßenfahrzeugen 598
2.4.7.1 Allgemeines 598
2.4.7.2 Ergebnisse neuerer Forschungen . . . 598
2.4.7.3 Anpralllasten an Pfeiler und andere stützende Bauteile 599
2.4.7.4 Anprall an Überbauten 600
2.4.7.5 Fahrzeuge auf Geh- und Radwegen . 600
2.4.7.6 Anprall an Schrammborde 601
2.4.7.7 Anprall an Schutzeinrichtungen 601
2.4.7.8 Anprall an tragende Bauteile oberhalb der Fahrbahnebene 602
2.4.8 Einwirkungen auf Geländer 602
2.4.9 Lastmodelle auf Hinterfüllungen . . . 602
2.4.9.1 Vertikallasten 602
2.4.9.2 Horizontallasten 603
2.4.10 Einwirkungen auf Kammerwände . . 603
2.4.11 Weitere Einwirkungen 604
2.4.11.1 Allgemeines 604
2.4.11.2 Fahrbahnbeläge 604
2.4.11.3 Klappbrücken 604
2.4.11.4 Versorgungsleitungen und andere ruhende Lasten 604
2.4.11.5 Einwirkungen aus Schnee 604
2.4.11.6 Auswechseln von Lagern 604
2.5 Einwirkungen aus Fußgänger- und Radverkehr 604
2.5.1 Anwendungsbereich 604
2.5.2 Lastmodelle für Vertikallasten 604
2.5.2.1 Gleichmäßig verteilte Last 604
2.5.2.2 Einzellast 605
2.5.2.3 Dienstfahrzeug 605
2.5.3 Horizontallasten 605
2.5.4 Mehrkomponentige Einwirkungen . . 605
2.5.5 Außergewöhnliche Einwirkungen . . . 605
2.5.5.1 Allgemeines 605
2.5.5.2 Anprall von Straßenfahrzeugen an Unterbauten 606
2.5.5.3 Anprall von Straßenfahrzeugen an Überbauten 606
2.5.5.4 Unplanmäßige Anwesenheit von Fahrzeugen auf der Brücke 606
2.5.6 Dynamische Modelle 606
2.5.6.1 Allgemeines 606
2.5.6.2 Neuere Forschungsergebnisse 606
2.5.6.3 Umsetzung der Forschungsergebnisse in den DIN-Fachbericht 101 bzw. in den Eurocode 1, Teil 2 606
2.5.7 Einwirkungen auf Geländer 607
2.5.8 Lastmodell für Hinterfüllung 607
2.5.9 Weitere typische Einwirkungen 607
2.6 Einwirkungen aus Eisenbahnverkehr 607
2.6.1 Anwendungsbereich 607
2.6.2 Darstellung der Einwirkungen 607
2.6.3 Lastmodelle für vertikale Einwirkungen 607
2.6.3.1 Allgemeines 607
2.6.3.2 Lastmodell 71 607
2.6.3.3 Lastmodelle SW/0 und SW/2 608
2.6.3.4 Unbeladener Zug 609
2.6.3.5 HSLM 609
2.6.3.6 Dienstgehwege 609
2.6.3.7 Öffentliche Gehwege 609

2.6.4 Lastverteilung der Achs- und Radlasten 609
2.6.4.1 Allgemeines 609
2.6.4.2 Lastverteilung der Radlast durch die Schiene in Längsrichtung 610
2.6.4.3 Lastverteilung durch Schwellen und Schotter in Längsrichtung 610
2.6.4.4 Lastverteilung durch Schwellen und Schotter in Querrichtung 610
2.6.4.5 Vertikale Ersatzlasten für Erdbauwerke und Erddrücke 610
2.6.5 Dynamische Einwirkungen 610
2.6.5.1 Allgemeines 610
2.6.5.2 Dynamischer Beiwert Φ (Φ_2, Φ_3) . . 611
2.6.5.3 Gefahr von Resonanz oder übermäßigen Schwingungen der Tragwerke 611
2.6.6 Lastmodelle für horizontale Einwirkungen 612
2.6.6.1 Fliehkräfte 612
2.6.6.2 Seitenstoß (Schlingerkraft) 612
2.6.6.3 Einwirkungen aus Bremsen und Anfahren 612
2.6.6.4 Längskraftabtragung 613
2.6.7 Druck-Sog-Einwirkungen 614
2.6.8 Zusätzliche Einwirkungen 615
2.6.9 Außergewöhnliche Einwirkungen . . . 616
2.6.9.1 Entgleisung auf Brücken 616
2.6.9.2 Entgleisungen unter Überbauungen von Bahnanlagen 617
2.6.9.3 Außergewöhnliche Einwirkung aus Fahrleitungsbruch 617
2.6.9.4 Außergewöhnliche Einwirkungen aus Straßenverkehr 617
2.6.10 Mehrkomponentige Einwirkungen . . 617
2.6.11 Lastmodelle für Ermüdungsberechnungen 617
2.6.12 Nachweise in den Grenzzuständen . . 618
2.6.12.1 Allgemeines 618
2.6.12.2 Teilsicherheits- und Kombinationsbeiwerte 618
2.6.12.3 Kriterien der Betriebssicherheit 618
2.7 Einwirkungen aus Wind 619
2.7.1 Allgemeines 619
2.7.1.1 Windeinwirkungen auf nicht schwingungsanfällige Brückenüberbauten 619
2.7.1.2 Windeinwirkungen auf schwingungsanfällige Brückenüberbauten 619
2.7.1.3 Windeinwirkungen auf Brückenunterbauten 619
2.8 Temperatureinwirkungen 620
2.8.1 Allgemeines 620
2.8.2 Neue Forschungsergebnisse 620
2.8.3 Beschreibung der Temperatureinwirkungen 620
2.8.3.1 Allgemeines 620
2.8.3.2 Überbaugruppen 620
2.8.3.3 Konstanter Temperaturanteil 621
2.8.3.4 Schwankung des konstanten Temperaturanteils 622
2.8.3.5 Linearer Temperaturanteil 622
2.8.3.6 Nichtlinearer Temperaturanteil 622
2.8.3.7 Temperaturunterschiede zwischen verschiedenen Bauteilen 623
2.8.3.8 Brückenpfeiler 623
2.9 Bewegungen von Lagern und Fahrbahnübergängen und ergänzende Regelungen für die Bemessung von Lagern 623
2.9.1 Allgemeines 623
2.9.2 Bemessungswerte der Bewegungen und Kräfte 623
2.9.3 Klimatische Temperatureinwirkungen 624
2.9.4 Reaktionskräfte an Festpunkten 624
2.9.5 Ergänzende Regelungen zur Lagerbemessung 625
2.10 Kombination der Einwirkungen 625
2.10.1 Allgemeines 625
2.10.2 Grenzzustände der Tragfähigkeit . . . 625
2.10.3 Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit 626

3 Einwirkungen auf Brücken nach DIN-Handbuch (Eurocode) in Beispielen 631
3.1 Beispiel Straßenbrücke 631
3.1.1 Allgemeines 631
3.1.2 Beschreibung und Darstellung des statischen Systems 631
3.1.3 Entwurfsparameter 632
3.1.4 Charakteristische Werte der einwirkenden Last- und Weggrößen . 633
3.1.4.1 Ständige Einwirkungen 633
3.1.4.2 Veränderliche Einwirkungen 634
3.1.5 Außergewöhnliche Einwirkungen . . . 644
3.1.5.1 Anpralllasten auf Unterbauten 644
3.1.5.2 Außergewöhnliche Einwirkungen auf der Brücke 644
3.1.6 Kombination der Einwirkungen 645
3.1.6.1 Lastgruppen aus Verkehr 645
3.1.6.2 Kombinationen in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit 646
3.1.6.3 Kombinationen in den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit 648
3.2 Beispiel Eisenbahnbrücke 649
3.2.1 Allgemeines 649
3.2.2 Beschreibung und Darstellung des statischen Systems 649
3.2.3 Entwurfsparameter 650
3.2.4 Charakteristische Werte der einwirkenden Last- und Weggrößen . 651
3.2.4.1 Ständige Einwirkungen 651
3.2.4.2 Veränderliche Einwirkungen 652
3.2.4.3 Außergewöhnliche Einwirkungen . . . 665
3.2.5 Kombination der Einwirkungen 666
3.2.5.1 Verkehrslastgruppen 666

3.2.5.2 Zusammenstellung der wesentlichen Einwirkungen 666
3.2.5.3 Kombinationen in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit . . 667
3.2.5.4 Kombinationen in den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit 667
3.3 Beispiel Geh- und Radwegbrücke . . . 668
3.3.1 Allgemeines 668
3.3.2 Beschreibung und Darstellung des statischen Systems 668
3.3.3 Entwurfsparameter 670
3.3.4 Charakteristische Werte der einwirkenden Last- und Weggrößen . 670
3.3.4.1 Ständige Einwirkungen 670
3.3.4.2 Veränderliche Einwirkungen 671
3.3.5 Kombination der Einwirkungen 675
3.3.5.1 Kombinationen in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit . . 675
3.3.5.2 Kombinationen in den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit 676

4 Literatur 677

XII Entwurf, Bemessung und Konstruktion von Betonbrücken 679
Karlheinz Haveresch, Reinhard Maurer

1 Anforderungen an Brücken 681
1.1 Eurocodes und DIN-Fachberichte . . . 681
1.2 Eurocode 2 und DIN-Handbuch Betonbrücken 682
1.3 Ergänzendes Regelwerk 685

2 Brückenentwurf 689
2.1 Vorentwurf 689
2.2 Entwurf 691
2.3 Tragwerksarten 696
2.3.1 Allgemeines 696
2.3.2 Balkenbrücken 696
2.3.3 Bogenbrücken 698
2.3.4 Sprengwerk 700
2.4 Brückenüberbauten 702
2.4.1 Allgemeines 702
2.4.2 Massive Platte 702
2.4.3 Plattenbalken 704
2.4.4 Kastenquerschnitte 706
2.5 Unterbauten 709
2.5.1 Allgemeines 709
2.5.2 Widerlager 709
2.5.3 Brückenpfeiler 713
2.6 Bauverfahren 714
2.6.1 Allgemeines 714
2.6.2 Überbauherstellung auf Traggerüst . . 714
2.6.3 Taktschiebeverfahren 715
2.6.4 Freivorbauverfahren 716
2.6.5 Fertigteilbauweise 718

3 Bemessung und Konstruktion von Betonbrücken nach Eurocode 2 719
3.1 Allgemeines 719
3.2 Grundlagen für die Tragwerksplanung 719
3.2.1 Anforderungen 719
3.2.2 Grundsätzliches zur Bemessung mit Grenzzuständen 719
3.2.3 Basisvariablen 720
3.2.4 Nachweisverfahren mit Teilsicherheitsbeiwerten 721
3.2.5 Versuchsgestützte Bemessung 722
3.2.6 Zusätzliche Anforderungen an Gründungen 722
3.2.7 Anforderungen an Befestigungsmittel 723
3.2.8 Bautechnische Unterlagen 723
3.3 Baustoffe 723
3.3.1 Beton 724
3.3.2 Betonstahl 727
3.3.3 Spannstahl 727
3.3.4 Komponenten von Spannsystemen . . 727
3.4 Dauerhaftigkeit und Betondeckung . 730
3.4.1 Allgemeines 730
3.4.2 Umgebungsbedingungen, Anforderungen an Beton und Betondeckung 730
3.5 Ermittlung der Schnittgrößen 731
3.5.1 Allgemeines 731
3.5.2 Schnittgrößen infolge Lasten 732
3.5.3 Schnittgrößen infolge Zwang 732
3.5.4 Schnittgrößen infolge Vorspannung . 736
3.5.5 Nachweise für Bauteile unter Normalkraft nach Theorie II. Ordnung 739
3.5.5.1 Imperfektionen 739
3.5.5.2 Berechnung der Effekte aus Theorie II. Ordnung 739
3.5.5.3 Behandlung der Rückstell- bzw. Reibungskräfte der Lager 741
3.5.5.4 Berücksichtigung des Kriechens beim Nachweis nach Theorie II. Ordnung 742
3.5.5.5 Zum Ansatz des E-Moduls 743
3.5.6 Modellbildung und Querverteilung . 744
3.6 Nachweise in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit (GZT) 747
3.6.1 Tragwiderstand bei Biegung mit Normalkraft 747
3.6.2 Mindestbewehrung für ausreichendes Ankündigungsverhalten 748
3.6.3 Tragwiderstand bei Querkraft 750
3.6.3.1 Bauteile ohne Querkraftbewehrung . 750
3.6.3.2 Bauteile mit Querkraftbewehrung . . 754
3.6.3.3 Mindestbewehrung für Querkraft . . . 756

3.6.4 Tragwiderstand bei Torsion 757
3.6.5 Stabwerkmodelle 760
3.6.6 Nachweis gegen Ermüdung 761
3.6.6.1 Nachweis gegen Ermüdung nach DIN EN 1992-2 761
3.6.6.2 Wöhlerlinie Betonstahl 761
3.6.6.3 Wöhlerlinien Spannstahl 762
3.6.6.4 Spannungsschwingbreiten 764
3.6.6.5 Ermittlung der Spannungen 764
3.6.6.6 Vereinfachter Nachweis 765
3.6.6.7 Betriebsfestigkeitsnachweis 766
3.6.6.8 Nachweis der schädigungsäquivalenten Schwingbreite $\Delta\sigma_{equ}$ . . 767
3.6.7 Nachweis gegen Anprall 768
3.7 Nachweise in den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit (GZG) . . . 769
3.7.1 Allgemeines und Begrenzung der Spannungen 769
3.7.2 Anforderungen für die Rissbreitenbegrenzung 769
3.7.3 Begrenzung der Rissbreiten 777
3.7.3.1 Allgemeines 777
3.7.3.2 Mindestbewehrung für die Begrenzung der Rissbreite 778
3.7.3.3 Mindestbewehrung im Bereich von Arbeitsfugen 779
3.7.3.4 Begrenzung der Rissbreiten bei abgeschlossenem Rissbild 780
3.7.3.5 Dicke Bauteile 780
3.7.4 Begrenzung der Schwingungen und dynamische Einflüsse 784
3.7.5 Begrenzung der Verformungen 784
3.8 Allgemeine Bewehrungs- und Konstruktionsregeln 784
3.8.1 Betonstahl 784
3.8.2 Spannstahl und Spannglieder 785
3.8.2.1 Vorspannung mit sofortigem Verbund 785
3.8.2.2 Vorspannung mit nachträglichem Verbund 785
3.8.2.3 Verankerung und Kopplung von Spanngliedern 785
3.8.2.4 Umlenkstellen 785
3.8.3 Konstruktionsregeln für Bauteile . . . 785
3.8.3.1 Oberflächenbewehrung bei vorgespannten Bauteilen 786
3.8.3.2 Stahlbetonwände 786
3.8.3.3 Sonderfälle 787
3.9 Besonderheiten bei Fertigteilbrücken 788
3.10 Bemessung für Bauzustände 791
3.11 Ergänzung für Betonbrücken mit externen Spanngliedern 792
3.11.1 Allgemeines 792
3.11.2 Grundsätze für die bauliche Durchbildung 793
3.11.3 Überwachung 795
3.12 Lager und Fahrbahnübergänge 795
3.12.1 Lagerung und Lager 795
3.12.2 Fahrbahnübergänge 800

4 Innovationen im Betonbrückenbau 800
4.1 Hochleistungsbeton 800
4.1.1 Technologie 800
4.1.2 Internationale Entwicklungen 801
4.1.3 Entwicklungen in Deutschland 802
4.2 Integrale und semi-integrale Bauwerke 804
4.3 Ergänzungen für Betonbrücken mit internen Spanngliedern ohne Verbund in Längsrichtung 809
4.3.1 Allgemeines 809
4.3.2 Ergänzende Regeln für die Bemessung 810
4.3.3 Ergänzende Regeln für die bauliche Durchbildung von Brücken mit Kastenquerschnitten 810
4.3.4 Ergänzende Regeln für Brücken mit Platten- oder Plattenbalkenquerschnitten 810

5 Nachrechnung und Verstärkung von Brücken 811

6 Literatur 816

XIII Die Nachrechnung von Betonbrücken – Fortschreibung der Nachrechnungsrichtlinie 819

Gero Marzahn, Josef Hegger, Reinhard Maurer, Konrad Zilch, Daniel Dunkelberg, Agnieszka Kolodziejczyk, Frederik Teworte

1 Ausgangslage 821

2 Bauwerksprüfung und Nachrechnung – zur Zustandsbewertung von Brücken 822

3 Überblick zur Nachrechnung von Bestandsbrücken 822

4 Erkenntnisse aus der Nachrechnung von Betonbrücken . . . 824
4.1 Allgemeines 824
4.2 Erfahrungen und Fortschreibung auf der Einwirkungsseite 824
4.2.1 Ermittlung der Schnittgrößen 824
4.2.2 Lastmodell für Anprall auf Brücken . 825

4.2.3 Verkehrslastmodell für Verkehr im 4+0-System (4+0-Verkehr) 826
4.3 Erfahrungen und Fortschreibung auf der Widerstandsseite 827
4.3.1 Überblick zu Nachweisdefiziten 827
4.3.2 Defizite der Querkrafttragfähigkeit . . 827
4.3.3 Defizite der Biegetragfähigkeit 828
4.3.4 Defizite der Torsionslängsbewehrung 828
4.3.5 Ermüdungsdefizite in den Koppelfugen 828
4.3.6 Defizite im Bruchankündigungsverhalten von Spannbetonbrücken . . 828
4.3.7 Defizite der Dekompression 829
4.3.8 Defizite der konstruktiven Durchbildung 829
4.3.9 Kleine Bauwerke 829
4.4 Nicht zukunftsfähige Brückentypen . 829

5 Erkenntnisse und Erfahrungen aus bisherigen Nachrechnungen der Stufe 4 830
5.1 Bisher angewendete Verfahren 830
5.1.1 Ansatz nach *Hegger/Görtz* 830
5.1.2 Druckbogenmodell 832
5.1.3 Nachweis auf Grundlage der Modified Compression Field Theory 833
5.1.3.1 Hintergrund 833
5.1.3.2 Querkraftbemessung nach kanadischer Norm CSA A23.3-04 . . 834
5.2 Anwendungsbeispiel Brücke Mersmannsstiege 836
5.2.1 Allgemeines 836
5.2.2 Bauwerksbeschreibung 836
5.2.3 Querkraftnachweis nach Stufe 1 und 2 der Nachrechnungsrichtlinie . . 837
5.2.4 Ansatz nach *Hegger/Görtz* 838
5.2.5 Druckbogenmodell 838
5.2.6 Nachweis auf Grundlage der Modified Compression Field Theory 841
5.2.7 Nichtlineare FEM 842

6 Erweiterte Ansätze zum Nachweis der Querkraft- und Torsionstragfähigkeit 844
6.1 Allgemeines 844
6.2 Querkraftnachweis auf Grundlage des Hauptzugspannungskriteriums . . 844
6.2.1 Allgemeines 844
6.2.2 Grundlagen 844
6.2.2.1 Technische Regelwerke 844
6.2.2.2 Aktuelle Untersuchungen 845
6.2.3 Empfehlung für die Nachrechnung . . 847
6.3 Querkraftnachweis auf Grundlage des modifizierten Fachwerkmodells mit Rissreibung 850
6.3.1 Grundlagen 850
6.3.2 Empfehlung für die Nachrechnung . . 851
6.4 Nachweis der Querkrafttragfähigkeit unter Ermüdungslasten 852
6.4.1 Allgemeines 852
6.4.2 Grundlagen 853
6.4.2.1 Technische Regelwerke 853
6.4.2.2 Aktuelle Untersuchungen 855
6.4.3 Empfehlung für die Nachrechnung . . 858
6.4.3.1 Allgemeiner Aufbau 858
6.4.3.2 Ansatz unter Vernachlässigung der Querkraftbewehrung 858
6.4.3.3 Ansatz unter Berücksichtigung der Querkraftbewehrung 861
6.5 Schub zwischen Balkensteg und Gurten 863
6.5.1 Allgemeines 863
6.5.2 Entwicklung des Nachweisformats in früheren Normengenerationen . . . 863
6.5.3 Empfehlungen für die Nachrechnung 865
6.6 Abminderung der Torsionssteifigkeit 866
6.6.1 Allgemeines 866
6.6.2 Erkenntnisse aus Versuchen unter kombinierter Beanspruchung aus Biegung, Querkraft und Torsion 867
6.6.3 Abminderung der Torsionssteifigkeit in früheren Regelwerken 868
6.6.4 Ansätze zur Ermittlung der Torsionssteifigkeit in der Literatur 868
6.6.4.1 Ansätze auf Grundlage eines räumlichen Fachwerkmodells 868
6.6.4.2 Ansätze mit Berücksichtigung der Steifigkeitsanteile von Druck- und Zugzone auf Querschnittsebene 868
6.6.5 Auswirkungen aus einer Abminderung der Torsionssteifigkeit 870
6.6.6 Empfehlung für die Nachrechnung . . 871
6.7 Anrechenbarkeit der Spannglieder auf die Torsionslängsbewehrung . . . 871
6.7.1 Grundlagen 871
6.7.2 Empfehlungen für die Nachrechnung 872
6.8 Berücksichtigung von Bügelbewehrung bei nicht eingehaltenen Konstruktionsregeln 873
6.8.1 Grundlagen 873
6.8.2 Auswertung repräsentativer Versuche 875
6.8.3 Empfehlungen für die Nachrechnung 876

7 Möglichkeiten zur Beurteilung der Querkraft- und Torsionstragfähigkeit mit wissenschaftlichen Methoden gemäß Nachweisstufe 4 . . 876
7.1 Einleitung 876
7.1.1 Zielsetzung 876
7.1.2 Auswahl geeigneter Methoden 876
7.2 Abzubildendes Werkstoffverhalten . . 878
7.2.1 Allgemeines 878

7.2.2 Werkstoffverhalten des Betons 878
7.2.2.1 Einaxiale Beanspruchungen 878
7.2.2.2 Zweiaxiale Beanspruchungen 879
7.2.2.3 Dreiaxiale Beanspruchung 880
7.2.3 Werkstoffverhalten der Bewehrung . 881
7.2.4 Verhalten des Verbundwerkstoffs Stahlbeton 881
7.3 Tragfähigkeitsermittlung auf Grundlage nichtlinearer FEM-Berechnungen 882
7.3.1 Materialmodelle 882
7.3.2 Modellierung der Verbundwerkstoffe Stahlbeton und Spannbeton 883
7.3.2.1 Geschichtete Flächenelemente 884
7.3.2.2 Embedded Elements 884
7.3.2.3 Modellierung der Vorspannung 884
7.4 Nachrechnung von Versuchen aus der Literatur 884
7.4.1 Allgemeines 884
7.4.2 Stahlbetonbalken mit Bügelbewehrung (BM 100) 885
7.4.3 Spannbetonbalken mit Bügelbewehrung 887
7.4.4 Bauteile ohne Querkraftbewehrung . 890
7.5 Berücksichtigung der Zuverlässigkeitsanforderungen bei der Beurteilung der Tragfähigkeit mit wissenschaftlichen Methoden ... 892
7.5.1 Problemstellung 892
7.5.2 Grundlagen 892
7.5.3 Untersuchungen für ein angepasstes Sicherheitskonzept 896
7.6 Abschließende Wertung und Perspektiven 898

8 Schlussfolgerungen und Ausblick ... 899

9 Literatur 900

XIV Normen und Regelwerke 905
Frank Fingerloos, Daia Zwicky, Thomas Vogel, Walter Potucek, Markus Vill

1 Einleitung 907

2 Normenreihe SIA 269 „Erhaltung von Tragwerken“ 907
2.1 Einleitung 907
2.2 Zielsetzungen der Normenserie SIA 269 908
2.3 Aufbau und Inhalt der Normenserie SIA 269 908
2.3.1 Aufbau der Normenserie SIA 269 .. 908
2.3.2 Norm SIA 269 „Grundlagen der Erhaltung von Tragwerken“ 909
2.3.2.1 Geltungsbereich und Begriffe 909
2.3.2.2 Grundsätze und Anforderungen 909
2.3.2.3 Aktualisierung 911
2.3.2.4 Tragwerksanalyse und Nachweise .. 911
2.3.2.5 Überprüfung 912
2.3.2.6 Erhaltungsmaßnahmen 913
2.3.3 Norm SIA 269/1 „Erhaltung von Tragwerken – Einwirkungen“ 913
2.3.4 Übrige bauweisenspezifische Erhaltungsnormen SIA 269/3-6 914
2.3.5 SIA 269/7 „Erhaltung von Tragwerken – Geotechnik“ 914
2.4 Norm SIA 269/2 „Erhaltung von Tragwerken – Betonbau“ 914
2.4.1 Abgrenzung zu neuen Betonbauten . 914
2.4.2 Fachausdrücke 915
2.4.3 Grundsätze 915
2.4.3.1 Anforderungen an die Kenntnisse der Planer 915
2.4.3.2 Überprüfung 915
2.4.3.3 Instandsetzungs- und Erhaltungsmaßnahmen 916
2.4.4 Aktualisierung von Baustoffkennwerten 916
2.4.4.1 Aktualisierungstiefe 916
2.4.4.2 Betonstahl 917
2.4.4.3 Spannstahl 918
2.4.5 Tragwerksanalyse und Nachweise .. 918
2.4.5.1 Plastisches Verformungsvermögen .. 918
2.4.5.2 Überprüfungswerte 919
2.4.5.3 Nachweis der Tragsicherheit 920
2.4.5.4 Nachweis der Gebrauchstauglichkeit 922
2.4.6 Statische und konstruktive Besonderheiten 922
2.4.6.1 Kraftfluss 922
2.4.6.2 Überprüfungswert der Verbundspannung 922
2.4.6.3 Bewehrungsverankerung 925
2.4.6.4 Bewehrungsstöße 926
2.4.6.5 Vorgespannte Tragwerke 926
2.4.6.6 Balken und Plattenbalken 926
2.4.6.7 Weitere Bauteile 927
2.4.6.8 Ermüdungsbeanspruchte Tragwerke . 927
2.4.7 Zustandserfassung 927
2.4.7.1 Grundsätze 927
2.4.7.2 Untersuchungsmethoden 927
2.4.8 Zustandsbeurteilung 928
2.4.8.1 Allgemeines 928
2.4.8.2 Schädigungen infolge AAR 929
2.4.8.3 Schädigungen infolge Korrosion der Bewehrung 930
2.4.8.4 Prognose der Zustandsentwicklung . 930
2.4.8.5 Überprüfungsbericht 931
2.4.9 Erhaltungsmaßnahmen 931
2.4.9.1 Grundprinzipien und Verfahren 931
2.4.9.2 Verstärkungen 932
2.4.9.3 Instandsetzungsverfahren 933
2.4.9.4 Qualitätssicherung 936
2.5 Zusammenfassung 936

3 Betonbrücken in Österreich – Planung und Konstruktion nach Eurocode 937
3.1 Einleitung 937
3.2 Grundlagen der Berechnung 938
3.2.1 Allgemeines 938
3.2.2 Probabilistisches Sicherheitskonzept, Zuverlässigkeit von Tragwerken 938
3.2.3 Semiprobabilistisches Sicherheitskonzept 939
3.2.4 Bemessungssituationen 940
3.2.5 Einwirkungskombinationen 940
3.2.5.1 Kombinationsbeiwerte 940
3.2.5.2 Grundkombination 941
3.2.5.3 Außergewöhnliche Einwirkungskombinationen und Kombinationen bei Erdbeben 941
3.2.6 Grenzzustände der Tragfähigkeit . . . 942
3.2.7 Teilsicherheitsbeiwerte der Einwirkungen 942
3.2.7.1 Nachweise der Lagesicherheit (EQU) 942
3.2.7.2 Nachweise (STR) gegen Versagen des Tragwerks oder eines seiner Teile 943
3.2.7.3 Geotechnische Nachweise (GEO) . . . 944
3.2.7.4 Bemessung von Lagern und Fahrbahnübergängen 944
3.2.8 Teilsicherheitsbeiwerte des Materials 945
3.2.9 Qualitätsmanagement 945
3.3 Allgemeine Einwirkungen auf Brücken 947
3.3.1 Ständige Einwirkungen 947
3.3.2 Klimatische Einwirkungen 947
3.3.2.1 Windlasten 947
3.3.2.2 Schneelasten 949
3.3.2.3 Temperaturänderungen 949
3.3.3 Außergewöhnliche Einwirkungen . . . 952
3.3.3.1 Außergewöhnliche Einwirkungen aus dem Anprall von Straßenfahrzeugen 952
3.3.3.2 Außergewöhnliche Einwirkungen aus dem Anprall von Eisenbahnfahrzeugen 952
3.3.3.3 Anprall von Eisenbahnfahrzeugen bei Unterwerfungen und in Unterflurtrassen (offene Bauweise) . . 955
3.3.3.4 Anprall von Binnenschiffen 955
3.3.4 Baulicher Brandschutz 955
3.3.5 Einwirkungen aus Bauzuständen . . . 956
3.3.6 Lastmodell für Hinterfüllungen und Widerlager 956
3.3.7 Erdbeben 956
3.3.7.1 Bodenbeschleunigung 956
3.3.7.2 Beanspruchungen infolge Erdbeben . 956
3.3.7.3 Berechnungsverfahren 959
3.4 Verkehrslasten auf Straßenbrücken . . 959
3.4.1 Vertikale Verkehrslasten 959
3.4.1.1 Lastmodell 1 960
3.4.1.2 Lastmodell 2 960
3.4.1.3 Lastmodell 3 961
3.4.1.4 Lastmodell 4 (Menschenansammlung) 962
3.4.1.5 Lasten auf Fußwegen und Radwegen 962
3.4.2 Horizontale Verkehrslasten 963
3.4.2.1 Lasten aus Bremsen und Anfahren . . 963
3.4.2.2 Fliehkräfte und andere Querlasten . . 963
3.4.2.3 Lasten auf Geländer 963
3.4.3 Lastmodelle für Ermüdungsberechnungen 963
3.4.4 Gebrauchstauglichkeit, Grenzwerte von Verformungen 964
3.5 Verkehrslasten auf Eisenbahnbrücken 965
3.5.1 Vertikale Verkehrslasten 965
3.5.1.1 Allgemeines 965
3.5.1.2 Lastmodelle 965
3.5.1.3 Dynamische Beiwerte 965
3.5.1.4 Längs- und Querverteilung der Lasten 967
3.5.2 Horizontale Verkehrslasten 967
3.5.3 Betriebslastenzüge 967
3.5.4 Schwingungen, dynamische Berechnung bei hohen Geschwindigkeiten . 968
3.5.5 Sonstige Verkehrslasten 968
3.5.5.1 Gehsteige 968
3.5.5.2 Bahnsteige 968
3.5.5.3 Geländer 969
3.5.6 Lastkombinationen, Lastgruppen . . . 969
3.5.7 Ermüdung 970
3.5.8 Gebrauchstauglichkeit, Grenzwerte von Verformungen 972
3.5.8.1 Allgemeines 972
3.5.8.2 Betriebssicherheit 972
3.5.8.3 Reisendenkomfort 973
3.6 Verkehrslasten auf Fußgängerbrücken 973
3.6.1 Allgemeines 973
3.6.2 Vertikallasten 973
3.6.3 Horizontallasten 973
3.6.4 Außergewöhnliche Einwirkungen, Erdbeben, Lasten auf Geländer 974
3.6.5 Dynamisches Modell für Fußgängerbrücken 974
3.7 Planung und Ausführung von Betonbrücken 974
3.7.1 Allgemeines 974
3.7.2 Baustoffe 975
3.7.2.1 Beton 975
3.7.2.2 Betonstahl 975
3.7.3 Dauerhaftigkeit und Betondeckung . 975
3.7.4 Berechnung der Schnittgrößen 976
3.7.4.1 Allgemeines 976
3.7.4.2 Fahrbahnplatten 976
3.7.4.3 Haupttragwerke 976

3.7.5 Tragwerke aus Spannbeton 977
3.7.5.1 Qualifikation des Personals für Spannarbeiten 977
3.7.5.2 Durchführung der Spannarbeiten . . . 978
3.7.6 Nachweise in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit 979
3.7.6.1 Allgemeines 979
3.7.6.2 Biegung 979
3.7.6.3 Querkraft, Torsion 979
3.7.7 Ermüdungsnachweise 979
3.7.7.1 Allgemeines 979
3.7.7.2 Ermüdungsfestigkeitsnachweis für den Betonstahl 980
3.7.7.3 Ermüdungsfestigkeitsnachweis für den Beton bei Druckbeanspruchung . 980
3.7.7.4 Ermüdungsfestigkeitsnachweis für den Beton bei Querkraftbeanspruchung . 980
3.7.8 Nachweise der Gebrauchstauglichkeit 981
3.7.8.1 Begrenzung der Spannungen 981
3.7.8.2 Begrenzung der Rissbreiten 983
3.7.9 Allgemeine Bewehrungsregeln 983
3.7.9.1 Betonstahl 983
3.7.9.2 Spannglieder 983
3.7.10 Konstruktionsregeln 985
3.7.10.1 Allgemeines 985
3.7.10.2 Mindestabmessungen 985
3.7.10.3 Konstruktive Durchbildung von Bauteilen 985
3.7.10.4 Arbeitsfugen 985
3.7.11 Ergänzende Regeln zu speziellen Bauweisen 986
3.7.11.1 Allgemeines 986
3.7.11.2 Ergänzende Regeln zu Taktschiebebrücken 986
3.7.11.3 Ergänzende Regeln zu Freivorbaubrücken 987
3.7.11.4 Ergänzende Regeln zu Bogenbrücken 987
3.8 Schlussbemerkung 988

4 Der Eurocode 2 für Betonbrücken in Deutschland 989

Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Konsolidierte Fassung 990
Inhalt 990
1 Allgemeines 990
1.1 Anwendungsbereich 990
1.1.2 Anwendungsbereich des Eurocode 2 Teil 2 990
1.2 Normative Verweisungen 990
1.4 Unterscheidung zwischen Prinzipien und Anwendungsregeln 991
1.5 Begriffe 991
1.5.2 Besondere Begriffe und Definitionen *(alphabetisch)* 991
1.106 Formelzeichen *(Auswahl)* 992
2 Grundlagen für die Tragwerksplanung 994
2.1 Anforderungen 994
2.1.1 Grundlegende Anforderungen 994
2.3 Basisvariablen 994
2.3.1 Einwirkungen und Umgebungseinflüsse 994
2.3.1.1 Allgemeines 994
2.3.1.2 Temperaturauswirkungen 994
2.3.1.3 Setzungs-/Bewegungsunterschiede 994
2.3.1.4 Vorspannung 995
2.3.2 Eigenschaften von Baustoffen, Bauprodukten und Bauteilen 995
2.3.2.2 Kriechen und Schwinden 995
2.3.3 Verformungseigenschaften des Betons 995
2.4 Nachweisverfahren mit Teilsicherheitsbeiwerten 995
2.4.2 Bemessungswerte 995
2.4.2.1 Teilsicherheitsbeiwerte für Einwirkungen aus Schwinden 995
2.4.2.2 Teilsicherheitsbeiwerte für Einwirkungen aus Vorspannung 995
2.4.2.3 Teilsicherheitsbeiwerte für Einwirkungen beim Nachweis gegen Ermüdung 996
2.4.2.4 Teilsicherheitsbeiwerte für Baustoffe 996
2.4.3 Kombinationsregeln für Einwirkungen 996
2.7 Anforderungen an Befestigungsmittel 996
3 Baustoffe 997
3.1 Beton 997
3.1.1 Allgemeines 997
3.1.2 Festigkeiten 997
3.1.3 Elastische Verformungseigenschaften 999
3.1.4 Kriechen und Schwinden 999
3.1.5 Spannungs-Dehnungs-Linie für nichtlineare Verfahren der Schnittgrößenermittlung und für Verformungsberechnungen 1002
3.1.6 Bemessungswert der Betondruck- und Zugfestigkeit 1002
3.1.7 Spannungs-Dehnungs-Linie für die Querschnittsbemessung 1002
3.1.8 Biegezugfestigkeit 1003
3.1.9 Beton unter mehraxialer Druckbeanspruchung 1003
3.2 Betonstahl 1003
3.2.1 Allgemeines 1003
3.2.2 Eigenschaften 1004
3.2.3 Festigkeiten 1004
3.2.4 Duktilitätsmerkmale 1004
3.2.5 Schweißen 1004
3.2.6 Ermüdung 1005
3.2.7 Spannungs-Dehnungs-Linie für die Querschnittsbemessung 1005

3.3 Spannstahl 1006
3.3.1 Allgemeines 1006
3.3.2 Eigenschaften 1007
3.3.3 Festigkeiten 1007
3.3.4 Duktilitätseigenschaften 1007
3.3.5 Ermüdung 1007
3.3.6 Spannungs-Dehnungs-Linie für die Querschnittsbemessung 1007
3.3.7 Spannstähle in Hüllrohren 1008
3.4 Komponenten von Spannsystemen 1008
3.4.1 Verankerungen und Spanngliedkopplungen 1008
3.4.2 Externe Spannglieder ohne Verbund 1008
3.4.2.1 Allgemeines 1008
3.4.2.2 Verankerung 1009
4 Dauerhaftigkeit und Betondeckung 1009
4.1 Allgemeines 1009
4.2 Umgebungsbedingungen 1009
4.3 Anforderungen an die Dauerhaftigkeit 1012
4.4 Nachweisverfahren 1012
4.4.1 Betondeckung 1012
4.4.1.1 Allgemeines 1012
4.4.1.2 Mindestbetondeckung c_{min} 1012
4.4.1.3 Vorhaltemaß 1014
5 Ermittlung der Schnittgrößen 1015
5.1 Allgemeines 1015
5.1.1 Grundlagen 1015
5.1.3 Lastfälle und Kombinationen von Einwirkungen 1015
5.1.4 Auswirkungen von Bauteilverformungen (Theorie II. Ordnung) . 1016
5.2 Imperfektionen 1016
5.3 Idealisierungen und Vereinfachungen 1016
5.3.1 Tragwerksmodelle für statische Berechnungen 1016
5.3.2 Geometrische Angaben 1017
5.3.2.1 Mitwirkende Plattenbreite (alle Grenzzustände) 1017
5.3.2.2 Effektive Stützweite von Balken und Platten 1018
5.4 Linear-elastische Berechnung 1018
5.5 Linear-elastische Berechnung mit begrenzter Umlagerung 1019
5.6 Verfahren nach der Plastizitätstheorie 1019
5.6.1 Allgemeines 1019
5.6.4 Stabwerkmodelle 1019
5.7 Nichtlineare Verfahren 1020
5.8 Berechnungen der Effekte aus Theorie II. Ordnung mit Normalkraft 1021
5.8.1 Begriffe 1021
5.8.2 Allgemeines 1021
5.8.3 Vereinfachte Nachweise für Bauteile unter Normalkraft nach Theorie II. Ordnung 1022
5.8.3.1 Grenzwert der Schlankheit für Einzeldruckglieder 1022
5.8.3.2 Schlankheit und Knicklänge von Einzeldruckgliedern 1023
5.8.4 Kriechen 1023
5.8.5 Berechnungsverfahren 1023
5.8.6 Allgemeines Verfahren 1023
5.8.8 Verfahren mit Nennkrümmung 1024
5.8.8.1 Allgemeines 1024
5.8.8.2 Biegemomente 1024
5.8.8.3 Krümmung 1025
5.9 Seitliches Ausweichen schlanker Träger 1025
5.10 Spannbetontragwerke 1025
5.10.1 Allgemeines 1025
5.10.2 Vorspannkraft während des Spannvorgangs 1026
5.10.2.1 Maximale Vorspannkraft 1026
5.10.2.2 Begrenzung der Betondruckspannungen 1026
5.10.2.3 Messung der Spannkraft und des zugehörigen Dehnwegs 1027
5.10.3 Vorspannkraft nach dem Spannvorgang 1027
5.10.4 Sofortige Spannkraftverluste bei sofortigem Verbund 1027
5.10.5 Sofortige Spannkraftverluste bei nachträglichem Verbund 1027
5.10.5.1 Elastische Verformung des Betons 1027
5.10.5.2 Reibungsverluste 1028
5.10.5.3 Verankerungsschlupf 1028
5.10.6 Zeitabhängige Spannkraftverluste bei sofortigem und nachträglichem Verbund 1028
5.10.7 Berücksichtigung der Vorspannung in der Berechnung 1029
5.10.8 Grenzzustand der Tragfähigkeit 1029
5.10.9 Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit und der Ermüdung 1030
6 Nachweise in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit (GZT) 1030
6.1 Biegung mit oder ohne Normalkraft und Normalkraft allein 1030
6.2 Querkraft 1032
6.2.1 Nachweisverfahren 1032
6.2.2 Bauteile ohne rechnerisch erforderliche Querkraftbewehrung . . . 1033
6.2.3 Bauteile mit rechnerisch erforderlicher Querkraftbewehrung 1035
6.2.4 Schubkräfte zwischen Balkensteg und Gurten 1037

6.2.5 Schubkraftübertragung in Fugen 1038
6.2.106 Querkraft und Querbiegung 1040
6.3 Torsion 1040
6.3.1 Allgemeines 1040
6.3.2 Nachweisverfahren 1041
6.3.3 Wölbkrafttorsion 1043
6.4 Durchstanzen 1043
6.4.1 Allgemeines 1043
6.4.2 Lasteinleitung und Nachweisschnitte 1044
6.4.3 Nachweisverfahren 1046
6.4.4 Durchstanzwiderstand für Platten oder Fundamente ohne Durchstanzbewehrung 1048
6.4.5 Durchstanzwiderstand für Platten oder Fundamente mit Durchstanzbewehrung 1049
6.5 Stabwerkmodelle 1051
6.5.1 Allgemeines 1051
6.5.2 Bemessung der Druckstreben 1051
6.5.3 Bemessung der Zugstreben 1051
6.5.4 Bemessung der Knoten 1052
6.6 Verankerung der Längsbewehrung und Stöße 1053
6.7 Teilflächenbelastung 1054
6.8 Nachweis gegen Ermüdung 1054
6.8.1 Allgemeines 1054
6.8.2 Innere Kräfte und Spannungen beim Nachweis gegen Ermüdung 1055
6.8.3 Einwirkungskombinationen 1056
6.8.4 Nachweisverfahren für Betonstahl und Spannstahl 1056
6.8.5 Nachweis gegen Ermüdung über schädigungsäquivalente Schwingbreiten 1058
6.8.6 Vereinfachte Nachweise 1058
6.8.7 Nachweis gegen Ermüdung des Betons unter Druck oder Querkraftbeanspruchung 1058
7 Nachweise in den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit (GZG) 1061
7.1 Allgemeines 1061
7.2 Begrenzung der Spannungen 1061
7.3 Begrenzung der Rissbreiten 1061
7.3.1 Allgemeines 1061
7.3.2 Mindestbewehrung für die Begrenzung der Rissbreite 1064
7.3.3 Begrenzung der Rissbreite ohne direkte Berechnung 1067
7.3.4 Berechnung der Rissbreite 1069
7.4 Begrenzung der Verformungen 1070
7.4.1 Allgemeines 1070
7.4.3 Nachweis der Begrenzung der Verformungen mit direkter Berechnung 1071
8 Allgemeine Bewehrungsregeln 1072
8.1 Allgemeines 1072
8.2 Stababstände von Betonstählen 1072
8.3 Biegen von Betonstählen 1072
8.4 Verankerung der Längsbewehrung 1073
8.4.1 Allgemeines 1073
8.4.2 Bemessungswert der Verbundfestigkeit 1074
8.4.3 Grundwert der Verankerungslänge 1074
8.4.4 Bemessungswert der Verankerungslänge 1075
8.5 Verankerung von Bügeln und Querkraftbewehrung 1077
8.7 Stöße und mechanische Verbindungen 1077
8.7.1 Allgemeines 1077
8.7.2 Stöße 1077
8.7.3 Übergreifungslänge 1079
8.7.4 Querbewehrung im Bereich der Übergreifungsstöße 1079
8.7.4.1 Querbewehrung für Zugstäbe 1079
8.7.4.2 Querbewehrung für Druckstäbe 1080
8.8 Zusätzliche Regeln bei großen Stabdurchmessern 1080
8.9 Stabbündel 1080
8.9.1 Allgemeines 1080
8.9.2 Verankerung von Stabbündeln 1081
8.9.3 Gestoßene Stabbündel 1081
8.10 Spannglieder 1081
8.10.1 Anordnung von Spanngliedern und Hüllrohren 1081
8.10.1.1 Allgemeines 1081
8.10.1.2 Spannglieder im sofortigen Verbund . 1082
8.10.1.3 Hüllrohre für Spannglieder im nachträglichen Verbund 1082
8.10.2 Verankerung bei Spanngliedern im sofortigen Verbund 1083
8.10.2.1 Allgemeines 1083
8.8.2.2 Übertragung der Vorspannung 1083
8.10.2.3 Verankerung der Spannglieder in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit 1084
8.10.3 Verankerungsbereiche bei Spanngliedern im nachträglichen oder ohne Verbund 1085
8.10.4 Verankerungen und Spannglied-kopplungen für Spannglieder 1086
8.10.5 Umlenkstellen 1087
9 Konstruktionsregeln 1087
9.1 Allgemeines 1087
9.2 Balken 1087
9.2.1 Längsbewehrung 1087
9.2.1.1 Mindestbewehrung und Höchstbewehrung 1087
9.2.1.2 Weitere Konstruktionsregeln 1087
9.2.1.3 Zugkraftdeckung 1088
9.2.1.4 Verankerung der unteren Bewehrung an Endauflagern 1089
9.2.1.5 Verankerung der unteren Bewehrung an Zwischenauflagern 1089

9.2.2 Querkraftbewehrung 1089
9.2.3 Torsionsbewehrung 1090
9.2.4 Oberflächenbewehrung 1091
9.2.5 Indirekte Auflager 1091
9.3 Vollplatten 1091
9.3.1 Biegebewehrung 1091
9.3.1.1 Allgemeines 1091
9.3.1.2 Bewehrung von Platten in Auflagernähe 1091
9.3.1.4 Randbewehrung an freien Rändern von Platten 1092
9.3.2 Querkraftbewehrung 1092
9.4 Punktgestützte Platten 1092
9.4.3 Durchstanzbewehrung 1092
9.5 Stützen 1094
9.5.1 Allgemeines 1094
9.5.2 Längsbewehrung 1094
9.5.3 Querbewehrung 1094
9.6 Wände 1095
9.6.1 Allgemeines 1095
9.6.2 Vertikale Bewehrung 1095
9.6.3 Horizontale Bewehrung 1095
9.6.4 Querbewehrung 1095
9.7 Wandartige Träger 1095
9.9 Bereiche mit geometrischen Diskontinuitäten oder konzentrierten Einwirkungen (D-Bereiche) 1096
10 Zusätzliche Regeln für Bauteile und Tragwerke aus Fertigteilen 1096
10.1 Allgemeines 1096
10.1.1 Besondere Begriffe dieses Kapitels 1096
10.2 Grundlagen für die Tragwerksplanung, Grundlegende Anforderungen 1097
10.3 Baustoffe 1097
10.3.1 Beton 1097
10.3.1.1 Festigkeiten 1097
10.3.1.2 Kriechen und Schwinden 1097
10.3.2 Spannstahl 1098
10.3.2.1 Eigenschaften 1098
10.5 Ermittlung der Schnittgrößen 1098
10.5.1 Allgemeines 1098
10.5.2 Spannkraftverluste 1098
10.9 Bemessungs- und Konstruktionsregeln 1098
10.9.4 Verbindungen und Lager für Fertigteile 1098
10.9.4.2 Konstruktions- und Bemessungsregeln für Verbindungen 1098
10.9.4.4 Verbindungen zur Querkraft-Übertragung 1099
10.9.4.5 Verbindungen zur Übertragung von Biegemomenten oder Zugkräften . . . 1099
10.9.5 Lager 1099
113 Bemessung für Bauzustände 1099
113.1 Allgemeines 1099
113.2 Einwirkungen während der Bauausführung 1099
113.3 Nachweiskriterien 1100
113.3.1 Grenzzustand der Tragfähigkeit 1100
113.3.2 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit 1100
Anhang A (normativ) Modifikation von Teilsicherheitsbeiwerten für Baustoffe 1100
A.2.3 Reduktion auf Grundlage der Bestimmung der Betonfestigkeit im fertigen Tragwerk 1100
Anhang B (normativ) Kriechen und Schwinden . . 1100
B.1 Grundgleichungen zur Ermittlung der Kriechzahl 1100
B.2 Grundgleichungen zur Ermittlung der Trocknungsschwinddehnung 1101
B.100 Allgemeines 1102
B.105 Abschätzung der verzögerten Langzeitverformungen 1102
Anhang J (normativ) Konstruktionsregeln für ausgewählte Beispiele 1103
Anhang NA.NN (normativ) Schädigungsäquivalente Schwingbreite für Nachweise gegen Ermüdung 1104
Anhang NA.TT (normativ) Ergänzungen für Betonbrücken mit externen Spanngliedern 1106
NA.TT.1 Allgemeines 1106
NA.TT.2 Begriffe 1106
NA.TT.3 Grundsätze für die bauliche Durchbildung 1106
NA.TT.3.1 Externe Spannglieder und interne Spannglieder ohne Verbund 1106
NA.TT.3.2 Mischbauweise 1106
NA.TT.3.3 Querspannglieder 1106
NA.TT.3.4 Maßnahmen zur Verstärkung, Instandsetzung und Zugänglichkeit 1107
NA.TT.3.5 Anker- und Umlenkelemente 1107
NA.TT.4 Überwachung 1108
Anhang NA.UU (normativ) Ergänzungen für Betonbrücken mit internen Spanngliedern ohne Verbund in Längstragrichtung 1108
NA.UU.1 Anwendungsbereich 1108
NA.UU.2 Ergänzende Regeln für die Bemessung 1109
NA.UU.3 Ergänzende Regeln für die bauliche Durchbildung 1109
NA.UU.3.1 Brücken mit Kastenquerschnitt 1109
NA.UU.3.2 Brücken mit Platten- oder Plattenbalkenquerschnitt 1109
Anhang NA.VV (normativ) Bewehrung von Stahlbetonstützen für den Anprall von Fahrzeugen 1110

5 Listen und Verzeichnisse 1111
5.1 Technische Baubestimmungen für den Beton- und Stahlbetonbau 1111
5.2 Bauproduktenverordnung, Muster-Liste der Technischen Baubestimmungen und Bauregellisten . . . 1129
5.2.1 Bauproduktenverordnung (EU-BauPVO) 1129
5.2.2 Muster-Liste der Technischen Baubestimmungen (M-LTB) 1132
5.2.3 Bauregellisten (BRL-A, BRL-B, Liste C) 1133
5.3 Richtlinien des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton e.V. 1134
5.4 Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E. V. (DBV): Merkblätter und Sachstandberichte 1134
5.4.1 DBV-Merkblatt: „Besondere Verfahren zur Prüfung von Frischbeton“ (2014-01) 1134
5.4.2 DBV-Merkblatt: „Betonierbarkeit von Bauteilen aus Beton und Stahlbeton – Planungs- und Ausführungsempfehlungen für den Betoneinbau“ (2014-01) 1136
5.4.3 DBV-Merkblatt: „Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren im Bauwesen“ (2014-01) 1136
5.4.4 DBV-Merkblatt: „Chemischer Angriff auf Betonbauwerke – Bewertung des Angriffsgrads und geeignete Schutzprinzipien“ (2014-07) 1137
5.4.5 Inhaltsverzeichnis der DBV-Merkblattsammlung 1137
5.5 Österreichische Bautechnik Vereinigung (ÖBV): Richtlinien, Merkblätter und Sachstandsberichte . . 1137

6 Literatur 1141

Stichwortverzeichnis 1147