

Konrad Zilch · Gerhard Zehetmaier

# Bemessung im konstruktiven Betonbau

Nach DIN 1045-1 (Fassung 2008)  
und EN 1992-1-1 (Eurocode 2)

2., neu bearbeitete und erweiterte Auflage

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Betonbauteile – Grundlagen, Tragverhalten</b>	1			
1.1	Verbundbaustoff Stahlbeton	1			
1.1.1	Kennzeichnende Eigenschaften des Verbundbaustoffs	1			
1.1.2	Tragwerke und Tragelemente des Betonbaus	2			
1.2	Verhalten eines Einfeldbalkens – Versuchsbeobachtungen	4			
1.2.1	Trag- und Verformungsverhalten	4			
1.2.2	Versagensformen	7			
1.2.3	Prinzip der Vorspannung	8			
1.2.4	Betrachtungsebenen – Querschnitt und System	10			
1.3	Aufgaben der Bemessung – Struktur des Buches	10			
1.4	Historie	11			
1.4.1	Geschichte des Betonbaus	11			
1.4.2	Normung	16			
1.5	Normengrundlage	18			
	Literatur	19			
<b>2</b>	<b>Konzepte und Grundlagen der Nachweise</b>	21			
2.1	Anforderungen an Bauten und deren Erfüllung	21			
2.1.1	Hintergrund – Anforderungen an bauliche Anlagen	21			
2.1.2	Grenzzustände und Dauerhaftigkeit	22			
2.1.3	Nachweiskonzepte	24			
2.2	Sicherheitskonzept	26			
2.2.1	Grundlagen	26			
2.2.2	Grundzüge der Zuverlässigkeitstheorie	30			
2.2.3	Einwirkungen und Einwirkungskombinationen	36			
2.2.4	Nachweiskonzept für den Grenzzustand der Tragfähigkeit	40			
2.2.5	Nachweiskonzept für die Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit	44			
2.3	Bezugsachsen und Querschnittswerte	46			
2.3.1	Koordinatensysteme und Bezugsachsen	46			
2.3.2	Mitwirkende Breite von Plattenbalken	48			
2.3.3	Kennwerte des ungerissenen Querschnitts	51			
2.4	Idealisierungen des Tragsystems	52			
2.4.1	Lagerungsbedingungen	53			
2.4.2	Effektive Stützweite	54			
2.4.3	Maßgebende Biegemomente an Innenauflagern	54			
	Literatur	56			
<b>3</b>	<b>Werkstoffkennwerte und Verbundverhalten</b>	59			
3.1	Beton	59			
3.1.1	Allgemeines	59			
3.1.2	Beton unter Druckbeanspruchung	60			
3.1.3	Beton unter Zugbeanspruchung	68			
3.2	Zeitabhängiges Verhalten von Beton	72			
3.2.1	Zeitabhängige Dehnungskomponenten	73			
3.2.2	Kriechen	74			
3.2.3	Kriechen bei veränderlichen Spannungen – Superposition	79			
3.2.4	Schwinden	83			
3.2.5	Auswirkungen zeitabhängiger Dehnungen auf Tragwerke	86			
3.3	Leichtbeton	86			

3.3.1	Trag- und Verformungsverhalten .....	87	<b>5</b>	<b>Grundlagen der Berechnung von Spannbetonbauteilen .....</b>	161
3.3.2	Normative Regelungen .....	87	5.1	Arten und Ausführung der Vorspannung	161
3.4	Betonstahl .....	89	5.1.1	Überblick .....	161
3.4.1	Arten .....	91	5.1.2	Vorspannung mit sofortigem Verbund .....	162
3.4.2	Eigenschaften .....	91	5.1.3	Vorspannung mit nachträglichem Verbund .....	162
3.4.3	Kennwerte .....	93	5.1.4	Vorspannung ohne Verbund .....	163
3.5	Spannstahl .....	95	5.2	Schnittgrößen aus Vorspannung bei statisch bestimmten Systemen .....	164
3.5.1	Arten .....	95	5.2.1	Allgemeines .....	164
3.5.2	Eigenschaften .....	95	5.2.2	Gleichgewicht am Querschnitt	165
3.5.3	Kennwerte für die Bemessung	97	5.2.3	Berechnung mit Anker- und Umlenkkraften .....	166
3.6	Verbund .....	99	5.2.4	Kreisförmiger oder parabolischer Spanngliedverlauf – Sonderfall	167
3.6.1	Verbundmechanismen .....	99	5.2.5	Anmerkungen zur Spanngliedführung .....	169
3.6.2	Einflussgrößen – Prüfung .....	101	5.2.6	Ermittlung von Spannungen infolge Vorspannung .....	171
3.6.3	Modellierung des Verbundes ..	103	5.3	Spannkraftverluste .....	171
3.6.4	Verbundverhalten von Spanngliedern .....	105	5.3.1	Überblick .....	171
3.7	Mehrachbiale Festigkeit von Beton ..	106	5.3.2	Spannkraftverluste während des Spannvorganges .....	173
3.7.1	Allgemeines .....	106	5.3.3	Zeitabhängige Spannkraftverluste .....	181
3.7.2	Mehrachbiale Festigkeit unbewehrten Betons .....	107	5.4	Rechenwerte der Vorspannkraft .....	184
3.7.3	Kraftübertragung über Risse hinweg .....	115	5.4.1	Zulässige Spannkraft .....	184
3.7.4	Mehrachbiale Festigkeit von Stahlbeton .....	118	5.4.2	Charakteristische Werte der Vorspannkraft .....	186
Literatur .....	121		5.4.3	Bemessungswert der Vorspannkraft .....	186
<b>4</b>	<b>Kraftfluss in Stahlbetonbauteilen – Stabwerkmodelle .....</b>	127	5.4.4	Spannbettzustand .....	187
4.1	Kraftfluss in Betonbauteilen .....	127	5.4.5	Anrechnung der Vorspannung bei Biegebeanspruchung .....	188
4.1.1	Spannungsfelder in ungerissenem Beton .....	127	Literatur .....	189	
4.1.2	Kraftfluss in gerissenem Beton – Stabwerke .....	128	<b>6</b>	<b>Biegung und Längskraft .....</b>	191
4.2	Stabwerkmodelle – Grundlagen .....	131	6.1	Tragverhalten, Bemessungsgrundlagen	191
4.2.1	Plastizitätstheorie und Grenzwertsätze .....	131	6.1.1	Schnittgrößen und Gleichgewichtsbedingungen ..	191
4.2.2	Diskontinuitätsbereiche .....	132	6.1.2	Tragverhalten des ungerissenen Balkens .....	192
4.2.3	Methodik des Bemessens mit Stabwerkmodellen .....	134	6.1.3	Tragverhalten des gerissenen Balkens – Grundsätze der Bemessung .....	194
4.3	Entwurf von Stabwerkmodellen .....	134	6.1.4	Versagensarten und Dehnungszustände .....	196
4.3.1	Modellierungsstrategie .....	134	6.1.5	Verformungsverhalten und Duktilität .....	198
4.3.2	Entwurfgrundsätze .....	136			
4.3.3	Ergänzungen .....	137			
4.4	Nachweis von Stabwerkmodellen .....	140			
4.4.1	Nachweis von Streben .....	140			
4.4.2	Nachweis von Knoten .....	142			
4.5	Typische Stabwerkmodelle .....	147			
4.5.1	Einleitung konzentrierter Kräfte	148			
4.5.2	Konsolen .....	152			
4.5.3	Abgesetzte Auflager .....	155			
4.5.4	Höhenversprung von Balken ..	157			
Literatur .....	158				

6.1.6	Äußere und innere Schnittgrößen .....	200	7.4.1	Allgemeines .....	248
6.2	Bemessung für überwiegende Biegung	203	7.4.2	Tragverhalten bei gerissenem, bewehrtem Trägersteg .....	249
6.2.1	Querschnitte ohne Druckbewehrung .....	203	7.4.3	Tragmodell und Bemessungsgrundlagen – Fachwerkanalogie .....	251
6.2.2	Querschnitte mit Druckbewehrung .....	208	7.4.4	Bemessung nach DIN 1045-1	257
6.2.3	Bemessungshilfsmittel .....	212	7.4.5	Bemessung nach EN 1992-1-1	261
6.2.4	Vereinfachte Bemessung – Näherungsbeziehungen .....	214	7.4.6	Interaktion von Biegung und Querkraft – Versatzmaß .....	263
6.3	Bemessung für überwiegende Längskraft .....	216	7.5	Mindestquerkraftbewehrung .....	264
6.3.1	Mittige Zugkraft und Zugkraft mit geringer Ausmitte	216	7.6	Bemessungswert der Querkraft – Maßgebender Schnitt .....	265
6.3.2	Drucknormalkraft .....	217	7.6.1	Direkte Lagerung – Auflagnernahe Lasten .....	266
6.3.3	Beliebige <i>M-N</i> - Kombinationen – Interaktionsdiagramm .....	218	7.6.2	Indirekte Lagerung .....	267
6.4	Querschnitte mit nicht rechteckiger Druckzone .....	221	7.6.3	Auswirkungen geneigter Gurte und Spannglieder .....	269
6.4.1	Allgemeines .....	221	7.7	Schub in Gurten gegliederter Querschnitte .....	272
6.4.2	Plattenbalken .....	222	7.7.1	Tragverhalten und Tragmodelle	272
6.4.3	Kreis- und Kreisringquerschnitte .....	226	7.7.2	Fachwerkmodell und Bemessung für Druckgurte ...	273
6.4.4	Allgemeine Querschnitte – Schiefe Biegung .....	226	7.7.3	Fachwerkmodell und Bemessung für Zuggurte .....	274
6.5	Bemessung vorgespannter Querschnitte	227	7.7.4	Interaktion von Längsschub und Querbiegung .....	274
6.5.1	Vorspannung mit Verbund ...	227	7.8	Schubfugen .....	277
6.5.2	Vorspannung ohne Verbund ...	230	7.8.1	Überblick .....	277
6.6	Sicherstellung ausreichender Duktilität – Mindestbewehrung .....	231	7.8.2	Tragverhalten und Tragmodelle	279
6.6.1	Mindestbewehrung bei Stahlbetonbauteilen .....	231	7.8.3	Nachweis von Schubfugen ...	282
6.6.2	Mindestbewehrung bei vorgespannten Bauteilen .....	232	7.8.4	Interaktion mit der Querkraftbemessung .....	285
Literatur .....		233	7.8.5	Ergänzende Hinweise .....	287
<b>7</b>	<b>Querkraft</b> .....	235	Literatur .....		291
7.1	Grundlagen .....	235	<b>8</b>	<b>Torsion</b> .....	295
7.2	Tragverhalten bei ungerissenem Trägersteg .....	237	8.1	Grundlagen .....	295
7.3	Bemessung von Bauteilen ohne Querkraftbewehrung .....	239	8.2	Tragverhalten bei reiner Torsion ...	296
7.3.1	Tragverhalten bei gerissenem, unbewehrtem Trägersteg .....	239	8.2.1	Spannungen in ungerissenen Bauteilen .....	297
7.3.2	Tragmodelle und Tragmechanismen .....	240	8.2.2	Tragverhalten gerissener Stahlbetonbauteile .....	300
7.3.3	Bemessung .....	243	8.3	Torsionstragfähigkeit von Bauteilen mit prismatischem Querschnitt .....	302
7.3.4	Interaktion von Biegung und Querkraft .....	247	8.3.1	Bemessungsgrundlagen .....	302
7.4	Bemessung von Bauteilen mit Querkraftbewehrung .....	248	8.3.2	Bemessung für reine Torsion ..	306
			8.4	Kombinierte Beanspruchungen .....	307
			8.4.1	Interaktion von Torsion mit Biegung und Längskraft .....	308
			8.4.2	Interaktion von Torsion mit Querkraft .....	308

Literatur .....	311	10.3.2 Kräfte und Verformungen des ungerissenen Zugstabes .....	374
<b>9 Durchstanzen</b> .....	313	10.3.3 Kräfte und Verformungen des gerissenen Zugstabes .....	374
9.1 Grundlagen .....	313	10.3.4 Auswirkungen langandauernder Zugbeanspruchung .....	378
9.1.1 Anwendungsbereiche .....	313	10.3.5 Vorgespannter Zugstab .....	378
9.1.2 Nachweis im Überblick .....	316	<b>10.4 Biegebeanspruchung</b> .....	381
9.1.3 Schnittgrößenermittlung .....	317	10.4.1 Allgemeines .....	381
9.2 Platten ohne Durchstanzbewehrung ..	321	10.4.2 Spannungen und Verformungen im Zustand I ..	382
9.2.1 Tragverhalten .....	321	10.4.3 Querschnittswerte und Spannungen im reinen Zustand II .....	383
9.2.2 Tragmodelle und Nachweiskonzept .....	322	10.4.4 Verformungsberechnung durch Integration der $M$ - $\kappa$ -Beziehung .....	387
9.2.3 Auswirkungen exzentrischer Stützenlasten .....	324	10.4.5 Vereinfachte Berechnung .....	392
9.2.4 Nachweis gegen Durchstanzen ohne Durchstanzbewehrung .....	331	10.4.6 Auswirkungen zeitabhängigen Verhaltens .....	395
9.2.5 Kollapsbewehrung .....	339	<b>10.5 Querkraft und Torsion</b> .....	399
9.3 Platten mit Durchstanzbewehrung ....	341	Literatur .....	400
9.3.1 Arten von Durchstanzbewehrung .....	341	<b>11 Nachweise in den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit</b> .....	403
9.3.2 Tragverhalten und Versagensformen .....	342	11.1 Allgemeines .....	403
9.3.3 Tragmodelle und Bemessungskonzepte .....	343	11.1.1 Nachweisumfang .....	403
9.3.4 Nachweis nach DIN 1045-1 ..	345	11.1.2 Nachweisgrundlagen .....	404
9.3.5 Nachweis nach EN 1992-1-1 ..	352	11.1.3 Vorspannung .....	404
9.4 Fundamente .....	354	11.2 Spannungsbegrenzungen .....	404
9.4.1 Allgemeines .....	355	11.2.1 Nachweise .....	404
9.4.2 Besonderheiten beim Durchstanznachweis .....	356	11.2.2 Anwendungsbereich – Maßgebender Grenzzustand ..	406
9.5 Vorgespannte Platten .....	358	11.3 Begrenzung der Biegeverformung .....	407
9.5.1 Allgemeines .....	358	11.3.1 Grenzwerte und Nachweisverfahren .....	407
9.5.2 Berücksichtigung der Vorspannung im Durchstanznachweis .....	359	11.3.2 Nachweis durch Berechnung der Verformungen .....	409
Literatur .....	361	11.3.3 Nachweis durch Begrenzung der Biegeschlankheit bei überwiegender Biegebeanspruchung .....	409
<b>10 Spannungen und Verformungen auf Gebrauchslastniveau</b> .....	365	11.4 Rissbreitenbegrenzung .....	411
10.1 Allgemeines .....	365	11.4.1 Ursachen und Erscheinungsformen von Rissen .....	412
10.1.1 Verformungen – Arten, Ursachen und Zweck der Berechnung .....	365	11.4.2 Allgemeines zu den Nachweisen – Anforderungsklassen .....	412
10.1.2 Grundlegende Annahmen .....	366	11.4.3 Berechnung der Rissbreite .....	415
10.2 Längsdruckkraft .....	366	11.4.4 Vereinfachte Nachweise – Konstruktionsregeln .....	418
10.2.1 Kurzzeitig wirkende Druckbeanspruchungen .....	366		
10.2.2 Auswirkungen zeitabhängigen Verhaltens .....	367		
10.3 Längszugkraft .....	371		
10.3.1 Tragverhalten bei kurzzeitiger Zugbeanspruchung	371		

11.4.5	Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite . . . .	420	13.2.6	Nachweis der Rotationsfähigkeit plastischer Gelenke . . . . .	502
11.4.6	Nachweise nach DIN 1045-1 . . . .	426	13.3	Indirekte Einwirkungen – Zwang . . . .	506
11.4.7	Nachweise nach EN 1992-1-1 . . . .	428	13.3.1	Grundlagen . . . . .	506
11.4.8	Besonderheiten bei Spannbetonbauteilen . . . . .	432	13.3.2	Überlagerung von Last und Zwang . . . . .	509
Literatur	. . . . .	436	13.3.3	Berücksichtigung von Zwang in GZG und GZT . . . . .	510
<b>12</b>	<b>Nachweise gegen Ermüdung</b> . . . . .	439	13.3.4	Auswirkungen zeitabhängigen Verhaltens . . . .	512
12.1	Grundlagen . . . . .	439	13.4	Vorgespannte, statisch unbestimmte Balken . . . . .	517
12.1.1	Anwendungsbereiche . . . . .	440	13.4.1	Allgemeines . . . . .	517
12.1.2	Grundbegriffe . . . . .	440	13.4.2	Berechnung der statisch unbestimmten Wirkung . . . . .	518
12.1.3	Nachweiskonzepte . . . . .	443	13.4.3	Ansatz der statisch unbestimmten Wirkung in Nachweisen . . . . .	523
12.2	Ermüdungsverhalten von Werkstoffen . . . . .	445	13.4.4	Entwurfsstrategien unter Nutzung der statisch unbestimmten Wirkung . . . . .	523
12.2.1	Betonstahl . . . . .	445	13.5	Torsion in statisch unbestimmten Systemen . . . . .	525
12.2.2	Spannstahl und Spannglieder . . . . .	450	Literatur	. . . . .	525
12.2.3	Beton . . . . .	452	<b>14</b>	<b>Dauerhaftigkeit</b> . . . . .	529
12.3	Ermüdungsverhalten bei Bauteilen – Spannungsermittlung . . . .	454	14.1	Allgemeines . . . . .	529
12.3.1	Bauteilverhalten – Versagensmechanismen . . . . .	454	14.2	Schädigungsmechanismen . . . . .	530
12.3.2	Betriebslasten . . . . .	456	14.2.1	Korrosion der Bewehrung . . . .	530
12.3.3	Schnittgrößenermittlung . . . . .	458	14.2.2	Betonangriff (Betonkorrosion) . . . . .	533
12.3.4	Spannungsermittlung . . . . .	459	14.3	Prinzipien zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit . . . . .	533
12.3.5	Besonderheiten bei Spannbeton . . . . .	462	14.3.1	Überblick . . . . .	533
12.3.6	Besonderheiten bei Querkraftbeanspruchungen . . . . .	466	14.3.2	Expositionsklassen . . . . .	534
12.4	Nachweis gegen Ermüdung . . . . .	471	14.3.3	Betondeckung . . . . .	535
12.4.1	Nachweisführung . . . . .	471	14.3.4	Normenregelung nach DIN 1045-1 und EN 1992-1-1 . . . . .	537
12.4.2	Betriebsfestigkeitsnachweis (Stufe 3) . . . . .	471	Literatur	. . . . .	541
12.4.3	Nachweis über schädigungsäquivalente Spannungsschwingbreiten (Stufe 2) . . . . .	475	<b>15</b>	<b>Grundlagen des Bewehrens von Stahlbetonbauteilen</b> . . . . .	543
12.4.4	Nachweis durch Spannungsbegrenzung (Stufe 1) . . . . .	477	15.1	Allgemeines . . . . .	543
Literatur	. . . . .	483	15.2	Grundlegende Bewehrungsregeln . . . .	544
<b>13</b>	<b>Statisch unbestimmte Systeme</b> . . . . .	487	15.2.1	Grundsätze . . . . .	544
13.1	Tragverhalten und Grundlagen . . . . .	487	15.2.2	Anordnung der Bewehrung im Querschnitt . . . . .	545
13.1.1	Tragverhalten . . . . .	487	15.2.3	Umlenkungen – Biegen von Betonstahl . . . . .	547
13.1.2	Folgerungen aus dem Tragverhalten . . . . .	489	15.3	Verankerung von Bewehrung . . . . .	549
13.1.3	Rotation plastischer Gelenke . . . . .	491	15.3.1	Verbundverankerung gerader Stäbe . . . . .	549
13.2	Schnittgrößenermittlung und Nachweiskonzepte im GZT . . . . .	493			
13.2.1	Allgemeines . . . . .	493			
13.2.2	Elastizitätstheorie . . . . .	494			
13.2.3	Plastizitätstheorie . . . . .	496			
13.2.4	Elastizitätstheorie mit Umlagerung . . . . .	498			
13.2.5	Nichtlineare Berechnung . . . . .	500			

15.3.2 Weitere Möglichkeiten der Verankerung .....	553	15.8.1 Zeichnungen für die Tragwerksplanung im Massivbau .....	572
15.4 Stoßverbindung von Bewehrungsstäben	554	15.8.2 Elemente einer Bewehrungszeichnung .....	573
15.4.1 Übergreifungsstöße .....	555	Literatur .....	575
15.4.2 Direkte Stöße .....	558	<b>Aktuelle Ergänzungen zur Schlussfassung des Nationalen Anhangs DIN EN 1992-1-1/NA vom November 2009</b>	577
15.5 Konstruktionsregeln für Balken .....	559	<b>Normen und Richtlinien</b> .....	579
15.5.1 Biegung .....	559	<b>Symbole und Bezeichnungen</b> .....	583
15.5.2 Querkraft .....	564	<b>Bemessungshilfsmittel</b> .....	587
15.5.3 Torsion .....	567	<b>Index</b> .....	619
15.5.4 Ergänzende Regeln für Plattenbalken .....	568		
15.6 Konstruktionsregeln für Stützen .....	568		
15.6.1 Längsbewehrung .....	569		
15.6.2 Querbewehrung .....	569		
15.7 Ausbildung indirekter Auflager .....	571		
15.8 Bewehrungszeichnungen .....	571		