

## Inhalts-Verzeichnis

Widmung . . . . .	V
Vorwort zur 3. Auflage . . . . .	VII
Vorwort zur 2. Auflage . . . . .	VII
Vorwort zur 1. Auflage . . . . .	VIII
Patente . . . . .	X
Zehn Gebote für den Spannbeton-Ingenieur . . . . .	XI
Spannbeton-Bezeichnungen . . . . .	XXIII
Kapitel 1 Grundbegriffe des Spannbetons . . . . .	1
Kapitel 2 Baustoffe . . . . .	15
Kapitel 3 Verankerungen und Stöße der Spannstähle . . . . .	69
Kapitel 4 Spanngeräte und das Vorspannen . . . . .	143
Kapitel 5 Vorspanngrade . . . . .	185
Kapitel 6 Die Bedeutung des Verbundes . . . . .	191
Kapitel 7 Längsbeweglichkeit und Gleitwiderstände von Spanngliedern, Spannkraftverlust durch Reibung, Spannweg . . . . .	203
Kapitel 8 Die Herstellung des nachträglichen Verbundes und des Korrosionsschutzes beim Vorspannen nach dem Erhärten des Betons . . . . .	245
Kapitel 9 Einleitung der Spannkräfte . . . . .	269
Kapitel 10 Grundsätze für die bauliche Durchbildung . . . . .	295
Kapitel 11 Die Berechnung vorgespannter Tragwerke . . . . .	331
Kapitel 12 Die rechnerische Behandlung der Einflüsse des Schwindens und Kriechens des Betons . . . . .	399
Kapitel 13 Der Bruchsicherheitsnachweis . . . . .	447
Kapitel 14 Sicherheit gegen Ermüdung bei schwingender Beanspruchung . . . . .	511
Kapitel 15 Stabilitätsprobleme vorgespannter Bauteile . . . . .	519
Kapitel 16 Sondergebiete der Vorspannung . . . . .	527
Kapitel 17 Feuerbeständigkeit des Spannbetons . . . . .	603
Kapitel 18 Bemerkenswerte Bruchversuche . . . . .	609
Kapitel 19 Hinweise für die Bauausführung, Lehrgerüste und dergleichen . . . . .	615
Kapitel 20 Geschichtliches . . . . .	625
Schrifttum . . . . .	641
Stichwortverzeichnis . . . . .	663
Anhang. Tafeln der Funktionen $e^{-x}$ und $1-e^{-x}$ . . . . .	671

### Inhaltsverzeichnis der Kapitel

#### Kapitel 1

##### 1. Grundbegriffe des Spannbetons

1.1 Die mangelhafte Zugfestigkeit des Betons . . . . .	1
1.2 Die Grundgedanken der Vorspannung . . . . .	1
1.3 Spannungsverluste durch Schwinden und Kriechen . . . . .	3
1.4 Die Notwendigkeit hochfester Stähle . . . . .	4
1.5 Folgerungen für die Berechnung und die zulässigen Spannungen . . . . .	5
1.6 Die hohe Verantwortung bei Spannbetonbauten . . . . .	5

1.7 Die Arten des Spannbetons . . . . .	6
1.8 Die Arten der Spannglieder . . . . .	8
1.9 Die äußeren Kräfte des Lastfalles Vorspannung . . . . .	8
1.10 Die Stahl- und Betonspannungen . . . . .	9
1.11 Die Bruchsicherheit . . . . .	11
1.12 Die kritische Last . . . . .	12
1.13 Rissesicherheit . . . . .	12
1.14 Rissesicherung . . . . .	12
1.15 Besondere Vorteile des Spannbetons . . . . .	12

## Kapitel 2

### 2. Baustoffe

2.1 Stahl . . . . .	15
2.11 Anforderungen an Spannstähle . . . . .	15
2.12 Stahlarten . . . . .	18
2.121 Naturharte Stähle . . . . .	18
2.122 Patentiert-gezogene Stähle . . . . .	20
2.123 Patentiert-gezogene, angelassene (gealterte) Stähle . . . . .	24
2.124 Kaltverformte Stähle, auch kaltverformte und angelassene Stähle . . . . .	24
2.125 Vergütete Stähle . . . . .	25
2.13 Das Kriechen der Stähle . . . . .	28
2.131 Versuchsergebnisse an gezogenen Stählen . . . . .	28
2.132 Versuchsergebnisse an vergüteten und angelassenen Stählen . . . . .	33
2.133 Kriechen der Stähle unter schwingender Beanspruchung . . . . .	34
2.134 Kennzeichnung der Kriecheigenschaften der Spannstähle . . . . .	35
2.135 Wie wird das Kriechen des Stahles berücksichtigt? . . . . .	36
2.14 Einfluß hoher Temperaturen auf Spannstähle . . . . .	36
2.15 Einfluß der Querpressung auf die Festigkeit der Spannstähle . . . . .	37
2.16 Die Biegespannungen in Spanngliedern . . . . .	38
2.17 Die Ermüdungsfestigkeit der Spannstähle . . . . .	40
2.171 Der für Spannbeton nötige Mindestwert der Schwingbreite des Stahles über $\sigma_u = \sigma_{vo}$ . . . . .	41
2.18 Gefährdung der Spannstähle durch Korrosion . . . . .	41
2.181 Gewöhnliche Korrosion . . . . .	41
2.182 Spannungskorrosion (Stress corrosion) . . . . .	42
2.183 Versprödung durch Wasserstoffaufnahme . . . . .	44
2.184 Schutzmaßnahmen . . . . .	45
2.2 Beton . . . . .	46
2.21 Erwünschte Eigenschaften und allgemeine Richtlinien . . . . .	46
2.22 Das Formänderungs-Verhalten des Betons . . . . .	51
2.23 Das Schwinden des Betons . . . . .	53
2.231 Was beeinflußt das Schwinden? . . . . .	53
2.232 Der zeitliche Verlauf des Schwindens . . . . .	54
2.233 Welches Schwindmaß ist bei Spannbeton zu berücksichtigen? . . . . .	55
2.24 Das Kriechen des Betons . . . . .	56
2.241 Abhängigkeiten des Kriechens von Beanspruchung und Betongüte . . . . .	56
2.242 Der zeitliche Verlauf des Kriechens . . . . .	57
2.243 Abhängigkeit der Kriechzahl vom Klima und dem Erhärtungsgrad . . . . .	58
2.244 Abhängigkeit der Kriechzahl vom Wasser-Zement-Faktor, vom Zement- und Mörtelgehalt und von der Körpergröße . . . . .	60
2.245 Einfluß der Gesteinsarten . . . . .	61
2.246 Welches Kriechmaß ist bei Spannbeton zu berücksichtigen? . . . . .	62
2.25 Schwind- und Kriechmessungen an ausgeführten Bauwerken . . . . .	62
2.251 Böckinger Brücke, Heilbronn am Neckar . . . . .	62
2.252 Lombardsbrücke, Hamburg . . . . .	63
2.253 Sandö-Brücke, Schweden . . . . .	64
2.254 Mehrgeschossige Stockwerksrahmen . . . . .	64

2.26	Festigkeiten des Betons . . . . .	65
2.261	Druckfestigkeit bei Kurzzeitbelastung . . . . .	65
2.262	Zugfestigkeit bei Kurzzeitbelastung . . . . .	66
2.263	Standfestigkeit bei Langzeitbelastung . . . . .	66
2.264	Ermüdungsfestigkeit . . . . .	66
2.27	Die Betonfestigkeit bei hohen Temperaturen, Versuchsergebnisse . . . . .	66
2.28	Die Wirkung niedriger Temperaturen auf die Betonfestigkeit . . . . .	67
2.29	Leichtbeton für Vorspannung . . . . .	68

### Kapitel 3

#### 3. Verankerungen und Stöße der Spannstähle

3.1	Verankerung unmittelbar im Beton . . . . .	69
3.11	Verankerung durch Krümmungen . . . . .	69
3.12	Schlaufenvverankerung . . . . .	76
3.13	Verankerung durch Haft-, Reibungs- und Scherverbund . . . . .	79
3.131	Verbundanker für Spannbettvorspannung . . . . .	79
3.132	Verbundverankerungen für Spannen nach dem Erhärten des Betons . . . . .	85
3.2	Verankerung mit Stahlteilen . . . . .	95
3.21	Parallele Gewinde . . . . .	95
3.22	Konisch auslaufende Gewinde . . . . .	99
3.23	Verankerung mit Keilen . . . . .	100
3.231	Kräftespiel an Keilverankerungen . . . . .	100
3.232	Beispiele für Keilverankerungen . . . . .	103
3.233	Vor dem Spannen hergestellte Keilverankerungen . . . . .	114
3.234	Aufgepreßte Keilringe . . . . .	116
3.24	Verankerung mit Seilköpfen . . . . .	118
3.25	Verankerung mit Ziehhülsen . . . . .	121
3.26	Verankerung mit angestauchten Köpfen . . . . .	122
3.27	Verankerung mit Schrägstreben . . . . .	126
3.28	Verankerung mit Tellerfedern . . . . .	127
3.29	Verankerung in erhärtetem Einpreßmörtel (Injektionsanker) . . . . .	127
3.3	Das Stoßen von Spannstählen und Spanngliedern . . . . .	129
3.31	Gewindemuffen . . . . .	129
3.32	Stöße mit Keilverbindungen . . . . .	130
3.33	Hartgelöte oder geschweißte Stöße . . . . .	132
3.34	Das Spleißen von Litzen . . . . .	132
3.35	Klemmenstöße . . . . .	132
3.36	Stoßarten im Beton . . . . .	133
3.37	Stoß mit vorgespannter Wickelung . . . . .	135
3.38	Ziehhülsenstoß . . . . .	136
3.4	Ermüdungsfestigkeit an Anker- oder Stoßstellen . . . . .	136
3.41	Gewindeverankerungen . . . . .	136
3.42	Keilanker . . . . .	137
3.43	Ziehhülsenverankerungen . . . . .	138
3.44	Schlaufenvverankerungen . . . . .	139
3.45	Seilköpfe . . . . .	139
3.46	Angestauchte Ankerköpfchen . . . . .	139
3.47	Einbetonierte Verbundanker . . . . .	140
3.48	Zusammenstellung der Schwingbreiten von Spannglied-Verankerungen . . . . .	141

### Kapitel 4

#### 4. Spanngeräte und das Vorspannen

4.1	Mechanische Geräte . . . . .	143
4.11	Einfache Geräte . . . . .	143
4.12	Wickelmaschinen . . . . .	145

<b>4.2 Hydraulische Geräte . . . . .</b>	<b>147</b>
4.21 Allgemeines über Pressen und Meßeinrichtungen . . . . .	147
4.22 Hochdruck-Pumpen . . . . .	149
<b>4.3 Übliche Spannpressen . . . . .</b>	<b>151</b>
4.31 Pressen für Einzel-Spannglieder . . . . .	151
4.32 Hydraulische Pressen für Spannbettvorspannung . . . . .	157
4.33 Große hydraulische Pressen für 200 bis 600 t . . . . .	158
4.34 Tellerpressen, Bandpressen (Kapselpressen) . . . . .	161
4.35 Wickelmaschinen für das Vorspannen von kreisrunden Behältern und Rohren . . . . .	162
<b>4.4 Das Vorspannen vor dem Erhärten des Betons (Spannbettvorspannung) . . . . .</b>	<b>165</b>
4.41 Das lange Spannbett . . . . .	165
4.42 Kurze Spannbetten . . . . .	167
4.421 Die thermo-elektrische Vorspannung der UdSSR . . . . .	167
<b>4.5 Das Vorspannen nach dem Erhärten des Betons . . . . .</b>	<b>168</b>
4.51 Vorbereitung . . . . .	168
4.52 Zeitlicher Ablauf des Vorspannens . . . . .	168
4.521 Stufenweises Vorspannen . . . . .	169
4.53 Örtlicher Ablauf des Vorspannens . . . . .	170
4.54 Der Spannvorgang . . . . .	171
4.541 Messung des Spannweges . . . . .	171
4.542 Unregelmäßigkeiten des Spannweges . . . . .	173
4.543 Genauigkeit der Spannwegmessung . . . . .	173
4.544 Die Gleichmäßigkeit der Vorspannung in Kabeln . . . . .	173
<b>4.6 Besondere Vorspannarten . . . . .</b>	<b>174</b>
4.61 Spannblöcke . . . . .	174
4.62 Spannfugen . . . . .	176
4.63 Spannen quer zur Spannrichtung (Spreizen) . . . . .	177
4.64 Kniehebel-Vorspannung . . . . .	179
4.65 Spannschlaufen . . . . .	179
4.66 Vor dem Einbau vorgespannte Spannglieder . . . . .	180
4.67 Vorspannen durch Erwärmen . . . . .	182
4.68 Bewickeln unter Vorspannung . . . . .	182
4.69 Weitere Verfahren . . . . .	183

## Kapitel 5

### 5. Vorspanngrade

<b>5.1 Allgemeines . . . . .</b>	<b>185</b>
<b>5.2 Die volle Vorspannung . . . . .</b>	<b>186</b>
<b>5.3 Die beschränkte Vorspannung . . . . .</b>	<b>186</b>
<b>5.4 Die mäßige Vorspannung . . . . .</b>	<b>189</b>
<b>5.5 Wirtschaftliche Gesichtspunkte zum Vorspanngrad . . . . .</b>	<b>189</b>

## Kapitel 6

### 5. Die Bedeutung des Verbundes

<b>6.1 Vorbemerkung . . . . .</b>	<b>191</b>
<b>6.2 Wirkung des Verbundes . . . . .</b>	<b>191</b>
6.21 Rostschutz und unterschiedliche Rostgefahr . . . . .	191
6.22 Der Einfluß des Verbundes auf die Bruchsicherheit . . . . .	192
<b>6.3 Der erforderliche Grad des Verbundes . . . . .</b>	<b>193</b>
<b>6.4 Teilweiser Verbund . . . . .</b>	<b>194</b>
<b>6.5 Haft- oder Verbundspannungen . . . . .</b>	<b>195</b>
6.51 Verbundspannungen im Zustand I . . . . .	195
6.52 Verbundspannungen im Zustand II . . . . .	195
6.53 Zulässige Haft- oder Verbundspannungen . . . . .	196

6.6 Verbundfestigkeiten (Gleitwiderstände) . . . . .	196
6.61 Versuche mit runden Blehröhren und runden Walzstäben . . . . .	197
6.62 Versuche mit rechteckigem Blechkasten und Litzenkabeln . . . . .	199

## Kapitel 7

### 7. Längsbeweglichkeit und Gleitwiderstände von Spanngliedern, Spannkraftverlust durch Reibung, Spannweg

7.1 Bauarten zur Erlangung der Längsbeweglichkeit von Spanngliedern . . . . .	203
7.11 Spannglieder mit Gleitanstrich . . . . .	203
7.12 Spannglieder umwickelt . . . . .	204
7.13 Spannglieder in Blechhüllen bzw. Hüllrohren . . . . .	204
7.14 Spannglieder in Betonkanälen . . . . .	211
7.15 Spannglieder neben den Stegen, in offenen Rillen oder Schlitzten . . . . .	212
7.2 Die Gleitwiderstände von Spanngliedern — Ursachen der Reibung . . . . .	213
7.21 Reibung durch Umlenkräfte . . . . .	213
7.211 Arten und Größe der Umlenkungen . . . . .	214
7.22 Reibung durch Klemmkräfte . . . . .	215
7.221 Mangelhafte Ordnung der Drähte . . . . .	215
7.222 Nacheinander gespannte Drähte . . . . .	215
7.223 Druck des Frischbetons . . . . .	216
7.23 Das Bremsen der Randdrähte . . . . .	216
7.3 Die Reibungsbeiwerte . . . . .	216
7.31 Versuche zur Bestimmung des Reibungsbeiwertes $\mu$ . . . . .	218
7.32 Bemerkungen zu den Reibungswerten . . . . .	222
7.33 Messung der Reibung an Spanngliedern in Bauwerken . . . . .	223
7.34 Für die Praxis übliche Reibungsbeiwerte $\mu$ und Welligkeiten $\beta$ von Spanngliedern . . . . .	225
7.4 Rechnerische Behandlung der Reibung für Spannen und Nachlassen . . . . .	227
7.41 Ermittlung des Verlaufes der Vorspannkraft . . . . .	227
7.42 Spannwegermittlung bei Berücksichtigung der Reibung . . . . .	232
7.43 Spannkraftverlust infolge Keilschlupf . . . . .	232
7.5 Zweckmäßige Ausbildung mehrteiliger Spannglieder im Hinblick auf Auspressen und Reibung	234
7.6 Vorspannhilfen zur Überwindung der Reibungswiderstände . . . . .	241
7.61 Hilfsspannstellen . . . . .	241
7.62 Hilfsspannglieder . . . . .	243
7.63 Erwärmung . . . . .	244
7.64 Verminderung der Reibung durch Vibrationsstöße . . . . .	244

## Kapitel 8

### 8. Die Herstellung des nachträglichen Verbundes und des Korrosionsschutzes beim Vorspannen nach dem Erhärten des Betons

8.1 Der Einpreßmörtel als Verbundmittel . . . . .	245
8.11 Wasserabsetzen und Raumänderungen bei Einpreßmörtel, Zusatzmittel . . . . .	245
8.12 Das Fließvermögen des Einpreßmörtels . . . . .	249
8.13 Die Druckfestigkeit des Einpreßmörtels . . . . .	252
8.14 Die Frostbeständigkeit des Einpreßmörtels . . . . .	252
8.15 Auswahl der Bindemittel und Zuschläge . . . . .	254
8.16 Geeignete Zusammensetzung des Einpreßmörtels . . . . .	255
8.17 Das Mischen des Einpreßmörtels . . . . .	255
8.2 Kunststoffe als Verbundmittel . . . . .	256
8.3 Die Einpreßtechnik . . . . .	257
8.31 Einpreßgeräte (Injektionsgeräte) . . . . .	257
8.32 Ausbildung der Einpreß- und Entlüftungsstellen . . . . .	258
8.33 Das Einpressen . . . . .	261

8.34 Bestimmung der nötigen Mörtelmenge . . . . .	265
8.35 Verstopfungen, Ursachen und Beseitigung . . . . .	265
8.36 Das Nachpressen . . . . .	266
8.37 Schutzmaßnahmen und Einpressen bei kalter Witterung . . . . .	267
8.4 Herstellen des nachträglichen Verbundes bei außen am Steg liegenden Kabeln . . . . .	267

## Kapitel 9

### 9. Einleitung der Spannkräfte

9.1 Allgemeines zur Einleitungszone . . . . .	269
9.2 Einzelkräfte am prismatischen Körper . . . . .	270
9.21 Die mittige Einzelkraft . . . . .	270
9.22 Die ausmittige Einzelkraft . . . . .	274
9.3 Mehrere Einzelkräfte am prismatischen Körper . . . . .	275
9.31 Mehrere Einzelkräfte übereinander . . . . .	275
9.32 Mehrere Einzelkräfte nebeneinander . . . . .	278
9.4 Spannkräfte zusammen mit Auflagerkraft am Balkenende . . . . .	279
9.41 Die mittige Spannkraft zusammen mit der Auflagerkraft am Balkenende . . . . .	279
9.42 Die ausmittige Spannkraft zusammen mit einer Auflagerkraft am Balkenende . . . . .	282
9.43 Mehrere Spannkräfte übereinander mit Auflagerkraft an einem Balkenende . . . . .	282
9.5 Krafteinleitung bei Verbundankern . . . . .	284
9.51 Der Einzelstab oder das Einzelbündel . . . . .	284
9.52 Mehrere Drähte mit Verbundanker . . . . .	285
9.6 Krafteinleitung bei Sammelspanngliedern . . . . .	285
9.61 Krafteinleitung bei Schlaufenankern . . . . .	285
9.611 Schlaufenanker mit anfänglichem Verbund . . . . .	286
9.612 Schlaufenanker ohne anfänglichen Verbund . . . . .	287
9.613 Schlaufen-Spannblöcke . . . . .	289
9.62 Krafteinleitung bei Fächerankern . . . . .	290
9.7 Krafteinleitung bei Zwischenankern . . . . .	290
9.8 Krafteinleitung in Plattenbalken oder dergleichen . . . . .	291

## Kapitel 10

### 10. Grundsätze für die bauliche Durchführung

10.1 Der einfache Balken bei Vorspannung nach dem Erhärten . . . . .	295
10.11 Bauhöhe, Spanngliedlage in $l/2$ , Querschnitt und Größe von $V$ . . . . .	295
10.12 Führung der Spannglieder bei verschiedenen Balkenformen . . . . .	297
10.13 Anordnung der Anker . . . . .	302
10.2 Der einfache Balken bei Vorspannung im Spannbett . . . . .	302
10.3 Durchlaufende Balken . . . . .	307
10.31 Bauhöhe und Querschnittsform . . . . .	307
10.32 Verlauf der Spannglieder . . . . .	308
10.33 Durchlaufträger durch Zusammenspannen von Teilstücken . . . . .	312
10.34 Spannglieder für teilweise Kontinuität . . . . .	314
10.35 Einfluß der Reibung der Spannglieder auf ihre Führung im Durchlaufbalken . . . . .	315
10.36 Der Kräfteverlauf auf Zwischenstützen . . . . .	316
10.4 Rahmentragwerke . . . . .	318
10.5 Richtlinien für die Anordnung schlaffer Bewehrung . . . . .	323
10.51 Schlaffe Bewehrung in Druckrichtung . . . . .	323
10.52 Querbewehrungen . . . . .	324
10.6 Lage und Abstände der Spannglieder . . . . .	325
10.61 Höhenlage der Spannglieder . . . . .	325
10.62 Gegenseitiger Abstand der Spannglieder . . . . .	326
10.63 Seitliche Lage der Spannglieder . . . . .	327
10.7 Besonderheiten beim Zusammenspannen von Fertigteilen . . . . .	327

## Kapitel 11

### 11. Die Berechnung vorgespannter Tragwerke

11.1 Was ist zu berechnen? . . . . .	331
11.2 Die Grundlagen der statischen Berechnung . . . . .	333
11.21 Allgemeines . . . . .	333
11.22 Spannkräfte . . . . .	333
11.221 Spannkräfte bei Spannbettvorspannung . . . . .	334
11.222 Spannkräfte beim Vorspannen gegen erhärteten Beton . . . . .	335
11.3 Ermittlung der Querschnittswerte . . . . .	337
11.31 Bauteile mit Spannbettvorspannung . . . . .	337
11.32 Nach dem Erhärten des Betons vorgespannte Bauteile . . . . .	338
11.33 Vorgespannte Betonbauteile ohne Verbund . . . . .	338
11.34 Zweckmäßige Anordnung der Berechnung der Querschnittswerte . . . . .	338
11.4 Ermittlung der Schnittkräfte . . . . .	339
11.41 Schnittkräfte am statisch bestimmt gelagerten Tragwerk bei Vorspannung ohne Verbund . . . . .	340
11.42 Schnittkräfte infolge $V$ an statisch bestimmt gelagerten Tragwerken. Vorspannung mit Verbund . . . . .	341
11.43 Schnittkräfte an statisch unbestimmten Tragwerken . . . . .	343
11.431 Die Wirkung der Vorspannung auf die statisch unbestimmten Größen . . . . .	343
11.432 Verfügbare Verfahren der Baustatik zur Ermittlung der statisch unbestimmten Schnittkräfte . . . . .	345
11.433 Der Zweifeldbalken mit parabolischem Spannglied. Wertvolle Erkenntnisse für die Spanngliedführung. Die Spannkraft wirkt an den Balkenenden in der Schwerlinie . . . . .	346
11.434 Der Zweifeldbalken mit parabolischem Spannglied. Die Spannkraft wirkt an den Balkenenden außerhalb der Schwerlinie . . . . .	350
11.435 Der Sonderfall feldweise gerader Spannglieder beim Zweifeldbalken . . . . .	352
11.436 Der dreifeldrige symmetrische Balken mit parabolischen Spanngliedern . . . . .	353
11.437 Allgemeinere Fälle . . . . .	353
11.438 Einfluß veränderlicher Trägheitsmomente . . . . .	354
11.44 Der eingespannte Balken als Grundlage für Ausgleichsverfahren . . . . .	356
11.441 Beidseitige Einspannung, parabelförmiges Spannglied, gleiche Endhöhenlage . . . . .	356
11.442 Beidseitige Einspannung, parabelförmiges Spannglied, ungleiche Endhöhenlage . . . . .	358
11.443 Beidseitige Einspannung, geradliniges Spannglied . . . . .	359
11.444 Beidseitige Einspannung, beliebig gekrümmtes Spannglied . . . . .	359
11.445 Gerades Spannglied mit Zwischenverankerung . . . . .	359
11.446 Einseitige Einspannung, parabolisches Spannglied, beliebige Endhöhenlage . . . . .	360
11.447 Einseitige Einspannung, polygonales Spannglied, beliebige Endhöhenlage . . . . .	360
11.448 Zusammenstellung der Einspannmomente $M_v$ und $M'_v$ an beidseitig und einseitig eingespannten Balken . . . . .	361
11.449 Hinweise für die Anwendung von Momenten-Ausgleichsverfahren nach Cross, Kani (oder anderen) auf mehrfach statisch unbestimmte vorgespannte Tragwerke . . . . .	364
11.5 Ermittlung der Spannungen . . . . .	366
11.51 Längsspannungen $\sigma_x$ . . . . .	366
11.52 Die Schubspannungen $\tau_{xy}$ . . . . .	366
11.521 Schubspannungen in parallelgurtigen Trägern . . . . .	366
11.522 Schubspannungen in Trägern mit veränderlicher Höhe . . . . .	367
11.53 Querspannungen $\sigma_y$ oder $\sigma_z$ . . . . .	369
11.54 Hauptspannungen . . . . .	370
11.55 Bemerkungen über zulässige Spannungen . . . . .	372
11.6 Bemessung . . . . .	372
11.61 Bemessungstafeln für Rechteckquerschnitte . . . . .	374
11.611 Fälle der Bemessung oder Spannungsermittlung für Rechteckquerschnitte . . . . .	374
11.612 Fälle der Nachprüfung für Rechteckquerschnitte . . . . .	381
11.62 Faustformeln für Rechteckquerschnitte und Vergleich der vollen und beschränkten Vorspannung . . . . .	382
11.621 Volle Vorspannung . . . . .	383
11.622 Beschränkte Vorspannung . . . . .	384

11.63 Bemessungstafeln für Plattenbalken, I- und Kastenquerschnitte . . . . .	385
11.631 Beispiele für die Vorbemessung mit den Tafeln 11.VI bis 11.XII . . . . .	386
11.64 Zur allgemeinen Ermittlung der erforderlichen Vorspannkraft . . . . .	394
11.641 Bemessung des Spannstahles . . . . .	395
11.65 Bemessung der Bewehrung für die Rissesicherung . . . . .	395
11.7 Spannungen und Bemessung bei zusammengesetzten Querschnitten . . . . .	396

## Kapitel 12

### 12. Die rechnerische Behandlung der Einflüsse des Schwindens und Kriechens des Betons

12.1 Abnahme der Spannkraft infolge Schwinden und Kriechen . . . . .	399
12.11 Vorbemerkung . . . . .	399
12.12 Ermittlung der Spannkraftabnahme infolge S. u. K. in Stufen von $\varphi$ (Differenzenrechnung) . . . . .	402
12.13 Abnahme der Spannkraft infolge S. u. K. mit Differenzialgleichung nach <i>Dischinger</i> . . . . .	405
12.14 Genäherte Ermittlung der Spannkraftabnahme infolge S. u. K. . . . .	407
12.15 Weitere Vereinfachung zur Ermittlung der Spannkraftabnahme durch S. u. K. von $V_\infty$ ausgehend . . . . .	409
12.16 Zusammenfassung für die Berechnung des Spannkraftverlustes in der Praxis bei normalen Bewehrungsverhältnissen (mäßige schlaffe Bewehrung) . . . . .	410
12.17 Die Berechnung der Spannkraftabnahme infolge S. u. K. mit fiktivem $E_b$ -Modul nach <i>B. Fritz</i> für statisch bestimmte gelagerte Balken . . . . .	411
12.171 Einfluß des Kriechens auf Lastfall Vorspannung und Dauerlast . . . . .	411
12.172 Einfluß des Schwindens nach Herstellung des Verbundes . . . . .	412
12.18 Veränderlichkeit der Spannkraftabnahme über die Länge des Tragwerks . . . . .	413
12.2 Der Einfluß der Stahleinlagen auf die Spannungen infolge Schwinden und Kriechen . . . . .	414
12.21 Die Spannungsumlagerung infolge S. u. K. beim mittig gedrückten, bewehrten Prisma .	416
12.211 Schlaffe Bewehrung allein, konstante Kraft $N$ . . . . .	416
12.212 Schlaffe Bewehrung und Spannstahl unter Vorspannkraft $V$ und konstanter Längskraft $N$ . . . . .	417
12.22 Die Kriechfasermethode von <i>A. Busemann</i> . . . . .	419
12.221 Eine Spanngliedlage (einsträngige Vorspannung) . . . . .	419
12.222 Die Kriechfasermethode für mehrere Spanngliedlagen (mehrsträngige Vorspannung) und für starke schlaffe Bewehrung (nach <i>Busemann-Habel</i> ) . . . . .	421
12.23 Tabellarische Zusammenstellung der Einflüsse von S. u. K. auf Spannungen und Dehnungen . . . . .	425
12.24 Hinweis auf Umlagerung von Schwind- und Kriechspannungen bei Verbundtragwerken aus verschieden altem Beton . . . . .	425
12.3 Die Verformung statisch bestimmt gelagerter Träger infolge Vorspannung und Schwinden und Kriechen . . . . .	425
12.31 Die Verkürzung der Balken (genähert) . . . . .	425
12.32 Die Biegelinie eines vorgespannten, statisch bestimmten Trägers infolge S. u. K. . . . .	426
12.321 Die allgemeine Lösung . . . . .	426
12.322 Formeln für Drehwinkel $\vartheta$ infolge S. u. K. für einfache Fälle . . . . .	427
12.323 Vereinfachte Lösung für einsträngige Vorspannung bei Vernachlässigung von $F_e$ für Kriechen . . . . .	431
12.324 Vereinfachte Lösung für Schwinden . . . . .	434
12.325 Näherungsformeln für einfache Balken . . . . .	435
12.4 Einfluß des Schwindens und Kriechens auf Zwängungskräfte statisch unbestimmter Tragwerke. Behinderung durch Stahleinlagen vernachlässigt . . . . .	436
12.41 Allgemeines . . . . .	436
12.42 Abbau von inneren Kräften durch Kriechen, die an einem statisch unbestimmten Tragwerk durch eine einmalige kurzzeitige Auflagerverschiebung entstehen . . . . .	437
12.43 Abbau von inneren Kräften durch Kriechen, die an einem statisch unbestimmten Tragwerk durch langsame, lang andauernde Verschiebung oder dergleichen entstehen, oder auch: Abbau von Schwindspannungen durch Kriechen . . . . .	439

12.5 Einfluß des Schwindens und Kriechens auf Zwängungs Kräfte statisch unbestimmter Tragwerke bei starker Bewehrung; durch S. u. K. geweckte Kräfte . . . . .	441
12.6 Zusammenfassung der Einflüsse aus Schwinden und Kriechen auf vorgespannte statisch unbestimmte Tragwerke . . . . .	445
12.61 Bei kleiner Eigensteifigkeit $J_f \approx 0$ der Stahleinlagen . . . . .	445
12.62 Bei starker Bewehrung . . . . .	446

## Kapitel 13

### 13. Der Bruchsicherheitsnachweis

13.1 Allgemeines zur Bruchsicherheit . . . . .	447
13.2 Die Brucharten . . . . .	449
13.21 Biegebrucharten mit Verbund . . . . .	450
13.22 Schubbrucharten mit Verbund . . . . .	451
13.3 Die Berechnung für Biegebruch. Kritisches Moment oder Bruchmoment . . . . .	453
13.31 Die Tragfähigkeit $Z$ der Biege-Zugzone . . . . .	453
13.311 Mindestquerschnitt der Stahleinlagen zur Verhütung der Bruchart 1 a . . . . .	453
13.312 Die Tragfähigkeit $Z$ der Stahleinlagen bei Bruchart 1 b . . . . .	454
13.313 Die Tragfähigkeit $Z$ der Stahleinlagen bei Bruchart 2 . . . . .	457
13.32 Die Tragfähigkeit $D$ der Biegendruckzone des Betons . . . . .	458
13.321 Die Ermittlung von $D$ bei Kurzzeitbelastung . . . . .	458
13.322 Vereinfachte Ermittlung von $D$ unter Beachtung des Einflusses der Dauerlast . . . . .	462
13.323 Genäherte Ermittlung von $D$ nach DIN 4227 . . . . .	464
13.324 Andere Näherungsermittlungen für $D$ . . . . .	464
13.325 Berücksichtigung einer Druckbewehrung in der Biegendruckzone . . . . .	465
13.33 Die Ermittlung des Bruchmomentes $M_n$ oder des kritischen Momentes $M_{kr}$ eines Trägerquerschnittes . . . . .	466
13.331 Bruchmoment bei Biegung und Biegung mit Längskraft mit einheitlicher Bemessungstafel nach <i>H. Rüsch</i> für rechteckige Druckzone . . . . .	466
13.332 Bemessungstafeln für Bruchmomente bei Kurzzeitbelastung nach Versuchsergebnissen . . . . .	467
13.333 Bemessungstafeln für Bruchmomente bei Dauerlast . . . . .	469
13.334 Beispiele zur Anwendung der Tafeln . . . . .	469
13.335 Die rechnerische Ermittlung des Bruchmomentes und Grenzbewehrungen für Rechteckquerschnitte . . . . .	474
13.336 Die graphische Ermittlung des Bruchmomentes nach <i>E. Mörsch</i> . . . . .	477
13.337 Vom Rechteck abweichende Querschnitte . . . . .	480
13.338 Bruchmoment bei Spanngliedern im Zug- und Druckgurt . . . . .	480
13.4 Bruchsicherheit auf Biegung bei statisch unbestimmt gelagerten Tragwerken . . . . .	481
13.41 Vorbemerkung . . . . .	481
13.42 Das Formänderungsverhalten auf Biegung . . . . .	482
13.43 Der Einfluß auf veränderlichen $EJ$ auf die Momentenverteilung . . . . .	485
13.44 Die rechnerische Ermittlung der Momentenverlagerung im Zustand II . . . . .	487
13.45 Die Momentenverlagerung durch plastische Gelenke im Bereich ③ . . . . .	487
13.46 Praktische Ermittlung der durch Momentenverlagerung möglichen Traglast . . . . .	489
13.47 Einfache Gleichgewichtsbedingungen für die Traglast von Durchlaufbalken . . . . .	491
13.471 Randfelder von durchlaufenden Balken . . . . .	491
13.472 Innenfelder von Durchlaufbalken . . . . .	493
13.48 Bruchsicherheitsnachweis bei Flächentragwerken . . . . .	493
13.5 Biege-Bruchsicherheit bei Spanngliedern ohne Verbund . . . . .	494
13.6 Bruchsicherheit auf Schub . . . . .	496
13.61 Allgemeines . . . . .	496
13.611 Zum Problem der Schubtragfähigkeit . . . . .	496
13.612 Zur Schubbemessung nach DIN 4227 (1953) . . . . .	498
13.613 Zum Schubbruchnachweis nach <i>R. Walther</i> . . . . .	498
13.62 Schubbemessung nach den CEB-FIP-Richtlinien von 1970 . . . . .	498
13.621 Übersicht . . . . .	499
13.622 Sicherheitsbeiwerte und Definitionen . . . . .	499

13.623 Schubbemessung von Balkenstegen . . . . .	499
13.624 Schubbemessung für Flansche und Gurtplatten . . . . .	504
13.625 Aufhängebewehrung bei indirekter Lagerung oder Belastung . . . . .	505
13.626 Zur Schubbemessung von Platten . . . . .	507
13.627 Zur Bemessung für Torsion . . . . .	508
13.63 Beispiele zur Anwendung der Schubbemessung nach CEB-FIP . . . . .	510
13.64 Ergebnisse von Schubversuchen . . . . .	510 f
13.65 Ergebnisse von Torsionsversuchen . . . . .	510 k

## Kapitel 14

### 14. Sicherheit gegen Ermüdung bei schwingender Beanspruchung

14.1 Allgemeines . . . . .	511
14.2 Folgerungen aus Versuchsergebnissen . . . . .	512
14.3 Die rechnerische Ermüdungsfestigkeit bei schwingender Biegebelastung . . . . .	513

## Kapitel 15

### 15. Stabilitätsprobleme vorgespannter Bauteile

15.1 Das Knicken eines vorgespannten Stabes . . . . .	519
15.2 Das Knicken vorgespannter Platten und Flächentragwerke . . . . .	520
15.3 Das Kippen vorgespannter Balken . . . . .	520
15.31 Kipp sicherheitsnachweise . . . . .	522

## Kapitel 16

### 16. Sondergebiete der Vorspannung

16.1 Das Vorspannen von runden Behältern . . . . .	527
16.11 Zylindrische Kreisbehälter . . . . .	527
16.111 Allgemeines . . . . .	527
16.112 Die zu beachtenden Kräfte . . . . .	528
16.113 Der Behälterboden . . . . .	530
16.114 Der Übergang vom Boden zur Wand . . . . .	531
16.115 Die Behälterwand . . . . .	533
16.116 Das Behälterdach . . . . .	538
16.117 Wirtschaftliche Größenverhältnisse . . . . .	541
16.12 Sonderformen der Spannbetonbehälter . . . . .	541
16.2 Spannbetonrohre und Spannbetonstollen . . . . .	545
16.21 Vorbemerkung . . . . .	545
16.22 Herstellung der Rohre . . . . .	545
16.23 Rohrverbindungen . . . . .	548
16.24 Spannbetonstollen und -düker . . . . .	549
16.25 Offene Gerinne . . . . .	549
16.3 Spannbeton-Straßen, -Startbahnen und -Beläge . . . . .	550
16.31 Allgemeines . . . . .	550
16.32 Die Beanspruchungen von Beton-Fahrbahnen . . . . .	550
16.321 Längenänderungen, Behinderung durch Reibung . . . . .	550
16.322 Temperatur- oder Schwindunterschiede . . . . .	552
16.323 Verkehrslasten . . . . .	552
16.33 Die Vorspannung . . . . .	553
16.331 Das zweckmäßige Maß der Vorspannung . . . . .	554
16.332 Die zulässige Spannung im Spannstahl . . . . .	554

16.34 Die baulichen Möglichkeiten von Spannbetonbahnen . . . . .	555
16.341 Spannbettvorspannung . . . . .	555
16.342 Vorspannung mit Spanngliedern in Hüllrohren . . . . .	555
16.343 Bewegungsfugen . . . . .	558
16.344 Längsvorspannung ohne Spannglieder (externe Vorspannung) . . . . .	559
16.345 Spannbetonbelag für Kanäle . . . . .	565
16.4 Spannbeton-Schwellen . . . . .	565
16.5 Maste, Pfähle und Spundwände aus Spannbeton . . . . .	568
16.51 Spannbetonmaste . . . . .	568
16.52 Spannbeton-Pfähle und -Spundwände . . . . .	571
16.6 Vorgespannte Falt- und Schalentragwerke . . . . .	573
16.61 Allgemeines . . . . .	573
16.62 Beispiele für Zylinderschalen . . . . .	575
16.63 Beispiele für Hyperboloid-Schalen . . . . .	581
16.64 Beispiele für Zusammenspannen vorgefertigter Schalenteile . . . . .	582
16.65 Beispiele für Faltwerke . . . . .	586
16.66 Beispiele vorgespannter Hängedächer . . . . .	587
16.7 Vorgespannte Fachwerke . . . . .	592
16.8 Vorgespannte Gründungsanker . . . . .	597

## Kapitel 17

### 17. Feuerbeständigkeit des Spannbetons

17.1 Allgemeines . . . . .	603
17.2 Einige Versuchsergebnisse an Spannbetonbalken und -decken . . . . .	604
17.3 Erfahrungen bei einem Großbrand . . . . .	606
17.4 Empfehlungen für die Sicherstellung der Feuerbeständigkeit von Spannbetontragwerken . . . . .	606
17.41 Ungeschützte Spannbetontragwerke . . . . .	607
17.42 Erhöhung der Feuerbeständigkeit durch Schutzschichten . . . . .	607

## Kapitel 18

### 18. Bemerkenswerte Bruchversuche

18.1 Einzelversuche an einfachen Balken . . . . .	609
18.2 Reihenversuche für Biegebruch . . . . .	610
18.3 Schubversuche an einfachen Balken . . . . .	610
18.4 Versuche über vorgefertigte Spannbetonbalken in Verbund mit Ort beton . . . . .	611
18.5 Versuche an alten Spannbettabalken . . . . .	612
18.6 Versuche an statisch unbestimmten Trägern . . . . .	612
18.7 Versuche an Platten . . . . .	613
18.8 Ermüdungsversuche bei schwingender Belastung . . . . .	613
18.9 Bruchversuche an fertigen Bauwerken . . . . .	613

## Kapitel 19

### 19. Hinweise für die Bauausführung, Lehrgerüste und dergleichen

19.1 Spannglieder . . . . .	615
19.2 Lehrgerüste . . . . .	619
19.3 Das Betonierprogramm . . . . .	622
19.4 Das Betonieren . . . . .	623
19.5 Das Vorspannen . . . . .	623
19.6 Bauüberwachung . . . . .	624
19.7 Unfallverhütung . . . . .	624

## Kapitel 20

### 20. Geschichtliches

625