

Fritz Leonhardt

---

# Vorlesungen über Massivbau

---

Fünfter Teil

Spannbeton

Von F. Leonhardt

mit Beiträgen über

Nachweise der Schwind- und Kriecheflüsse  
von D. Schade

Grenznachweise mit der Plastizitätstheorie  
von R. Walther



Springer-Verlag

Berlin · Heidelberg · New York 1980

# Inhaltsverzeichnis

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| <u>0.</u> | <u>Besondere Zeichen im Spannbetonbau</u>                         | 1  |
| <u>1.</u> | <u>Schrifttum und Vorschriften</u>                                | 3  |
| 1.1       | Aus den Anfängen des Spannbetons                                  | 3  |
| 1.2       | Neueres Schrifttum  | 3  |
| 1.3       | Vorschriften  | 4  |
| <u>2.</u> | <u>Grundgedanke und Begriffe</u>                                  | 5  |
| 2.1       | Der Grundgedanke der Vorspannung                                  | 5  |
| 2.2       | Besondere Vorteile des Spannbetons                                | 8  |
| 2.3       | Zum Spannbeton gehörende Begriffe                                 | 8  |
| 2.3.1     | Mittel zur Vorspannung  | 8  |
| 2.3.2     | Arten der Vorspannung   | 9  |
| 2.3.3     | Arten der Verankerung der Spannglieder                            | 9  |
| 2.3.4     | Grad der Vorspannung  | 10 |
| 2.3.5     | Grad der Federung der Vorspannung                                 | 10 |
| 2.3.6     | Verformungsabhängige Begriffe                                     | 10 |
| 2.3.7     | Die von den Spanngliedern auf den Beton ausgeübten äußeren Kräfte | 11 |
| <u>3.</u> | <u>Geschichtliches</u>  | 13 |
| <u>4.</u> | <u>Baustoffe und Bauteile</u>                                     | 17 |
| 4.1       | Beton   | 17 |
| 4.2       | Spannstähle   | 18 |
| 4.2.1     | Anforderungen an Spannstähle                                      | 18 |
| 4.2.2     | Erforderliche Prüfung der Spannstähle                             | 19 |
| 4.2.3     | Arten der Spannstähle   | 20 |
| 4.2.3.1   | Naturharte Stabstähle   | 20 |
| 4.2.3.2   | Spannstahl-Drähte   | 20 |
| 4.2.4     | Korrosion der Spannstähle   | 24 |
| 4.2.5     | Kriechen und Relaxation der Spannstähle                           | 25 |
| 4.2.6     | Einfluß hoher und niedriger Temperaturen auf Spannstähle          | 29 |
| 4.2.7     | Einfluß der Querpressung auf die Festigkeit der Spannstähle       | 31 |
| 4.2.8     | Biegespannungen in Spanngliedern                                  | 31 |
| 4.2.9     | Die Dauerschwingfestigkeit der Spannstähle                        | 33 |
| 4.3       | Hüllrohre   | 35 |
| 4.4       | Einpreßmörtel   | 36 |

|   |     |
|---|-----|
| <u>5. Verbund</u> . . . . .   | 39  |
| 5.1 Verbundfestigkeit . . . . .   | 39  |
| 5.2 Verbundspannungen . . . . .   | 44  |
| <u>6. Tragverhalten von Spannbetonträgern</u> . . . . .   | 47  |
| 6.1 Tragverhalten bei Biegebeanspruchung . . . . .  | 47  |
| 6.2 Tragverhalten bei Querkraft-Schubbeanspruchung . . . . .  | 57  |
| 6.3 Einfluß gekrümmter Spannglieder auf die Schubtragfähigkeit . . . . .                            | 62  |
| 6.4 Tragverhalten bei Torsion . . . . .   | 64  |
| 6.5 Tragverhalten bei mittigem Zug . . . . .  | 65  |
| <u>7. Wahl des Vorspanngrades</u> . . . . .   | 69  |
| 7.1 Definition des Vorspanngrades . . . . .   | 69  |
| 7.2 Beurteilung des Vorspanngrades . . . . .  | 69  |
| 7.3 Kriterien zur Beurteilung des Vorspanngrades . . . . .  | 71  |
| 7.3.1 Einfluß des Vorspanngrades auf die Stahlspannungen . . . . .                                  | 71  |
| 7.3.2 Einfluß des Vorspanngrades auf Rißbreiten und Durchbiegungen . . . . .                        | 73  |
| 7.4 Wie wählt man den Vorspanngrad? . . . . .   | 77  |
| 7.5 Zur Situation der Vorschriften . . . . .  | 78  |
| <u>8. Beständigkeit der Spannbetontragwerke gegen Korrosion</u> . . . . .                           | 79  |
| 8.1 Erfahrungen . . . . .   | 79  |
| 8.2 Vorspanngrad und Korrosionsgefahr . . . . .   | 79  |
| 8.3 Regeln zur Sicherung der Beständigkeit gegen Korrosion . . . . .                                | 80  |
| <u>9. Ermüdungs- und Betriebsfestigkeit der Spannbetontragwerke</u> . . . . .                       | 83  |
| <u>10. Verankerungen und Stöße der Spannstähle und Spannglieder</u> . . . . .                       | 87  |
| 10.1 Verankerungen durch Verbund . . . . .  | 87  |
| 10.1.1 Spannungen am gerippten Einzeldraht . . . . .  | 87  |
| 10.1.2 Verbundverankerung für Drahtbündel . . . . .   | 90  |
| 10.1.3 Fächerverankerungen . . . . .  | 90  |
| 10.2 Verankerung von glatten Spanndrähten unmittelbar im Beton durch Krümmung und Reibung . . . . . | 92  |
| 10.3 Schlaufenverankerungen . . . . .   | 94  |
| 10.4 Verankerungen mit Gewinden und Muttern . . . . .   | 96  |
| 10.5 Verankerung mit Keilen . . . . .   | 98  |
| 10.6 Verankerung mit Ziehhülsen und Preßhülsen . . . . .  | 103 |
| 10.7 Verankerung mit angestauchten Köpfen . . . . .   | 104 |
| 10.8 Stoßen und Koppeln von Spanngliedern . . . . .   | 106 |
| 10.8.1 Gewindemuffen und Preßmuffen . . . . .   | 106 |
| 10.8.2 Stöße mit Keilverbindungen . . . . .   | 107 |
| 10.8.3 Schraubstöße . . . . .   | 108 |
| 10.8.4 Zur Ermüdungsfestigkeit der Verankerungen und Koppelungen . . . . .                          | 108 |
| 10.9 Anordnung der Spanngliedanker . . . . .  | 111 |
| 10.9.1 Feste Anker . . . . .  | 111 |
| 10.9.2 Spannbarer Anker . . . . .   | 111 |

|  |     |
|--|-----|
| <u>11. Spanverfahren und ihre Wahl</u> .....   | 117 |
| <u>12. Spanweisen und Spanngeräte</u> .....  | 121 |
| 12.1 Das Spannen mit hydraulischen Pressen .....   | 121 |
| 12.1.1 Allgemeines .....   | 121 |
| 12.1.2 Beispiele hydraulischer Pressen .....   | 123 |
| 12.2 Besondere Vorspannweisen .....  | 128 |
| 12.2.1 Spannfuge .....   | 128 |
| 12.2.2 Spannen quer zur Spannrichtung .....  | 128 |
| 12.2.3 Bewickeln unter Vorspannung .....   | 129 |
| <u>13. Spannglieder in Gleitkanälen, Reibung und Aufbau</u> .....  | 131 |
| 13.1 Ursachen der Reibung .....  | 131 |
| 13.2 Der Reibungsbeiwert .....   | 133 |
| 13.3 Reibungsmindernde Maßnahmen .....   | 135 |
| 13.4 Berechnung der Spannkraftverluste infolge Reibung .....   | 137 |
| 13.5 Verlauf der Spannkraft infolge Reibung .....  | 139 |
| 13.6 Aufbau der Spannglieder .....   | 141 |
| <u>14. Das Vorspannen, Spannweg-Berechnung und Herstellen des nachträglichen Verbundes</u> .....                               | 145 |
| 14.1 Vorspannen mit sofortigem Verbund .....   | 145 |
| 14.2 Vorspannen mit nachträglichem Verbund .....   | 145 |
| 14.2.1 Vorbereitung .....  | 145 |
| 14.2.2 Zeitlicher Ablauf des Vorspannens .....   | 146 |
| 14.2.3 Örtlicher Ablauf des Vorspannens .....  | 146 |
| 14.3 Der Spannvorgang .....  | 147 |
| 14.3.1 Messungen beim Spannen .....  | 147 |
| 14.3.2 Unregelmäßigkeiten des Spannweges .....   | 149 |
| 14.4 Rechnerische Ermittlungen des Spannweges .....  | 150 |
| 14.5 Herstellung des nachträglichen Verbundes mit Einpreßmörtel .....  | 152 |
| <u>15. Aufzählung der erforderlichen Nachweise</u> .....   | 155 |
| 15.1 Erforderliche Nachweise .....   | 155 |
| 15.2 Hinweise für die Berechnungsannahmen .....  | 157 |
| <u>16. Schnittkräfte und Spannungen infolge Vorspannung</u> .....  | 159 |
| 16.1 Die Wirkung der Vorspannung auf den Beton .....   | 159 |
| 16.2 Schnittkräfte und Spannungen am statisch bestimmten Träger .....  | 161 |
| 16.2.1 Schnittkräfte im Beton .....  | 161 |
| 16.2.2 Ermittlung der Spannungen für Gebrauchslast .....   | 164 |
| 16.2.3 Ermittlung der Längsspannungen $\sigma_x$ bei Spannbettvorspannung .....  | 166 |
| 16.2.4 Gebrauchslastspannungen im Zustand II .....   | 168 |
| 16.3 Schnittkräfte in vorgespannten, statisch unbestimmt gelagerten Tragwerken und Folgerungen für die Spanngliedführung ..... | 169 |
| 16.3.1 Grundsätzliches zur Wirkungsweise .....   | 169 |
| 16.3.2 Berechnungsverfahren zur Ermittlung von Zwangs-Schnittkräften infolge Vorspannung .....                                 | 171 |

|            |   |            |
|------------|---|------------|
| 16.3.3     | Grundsätzliche Erkenntnisse am Zweifeldbalken mit parabolischem Spannglied . . . . .              | 173        |
| 16.3.3.1   | Berechnung mit Schnittkraft $M$ als Unbekannte . . . . .  | 173        |
| 16.3.3.2   | Berechnung mit Umlenkkräften . . . . .  | 178        |
| 16.3.3.3   | Spannkraft greift am Balkenende außerhalb der Schwerlinie an (parabolisches Spannglied) . . . . . | 180        |
| 16.3.3.4   | Sonderfall: feldweise gerade Spannglieder . . . . .   | 183        |
| 16.3.4     | Balken mit mehr als zwei Feldern und allgemeine Fälle . . . . .                                   | 184        |
| 16.3.5     | Der eingespannte Balken als Grundlage für Ausgleichsverfahren . . . . .                           | 188        |
| 16.3.5.1   | Beidseitige Einspannung . . . . .   | 188        |
| 16.3.5.2   | Einseitige Einspannung . . . . .  | 190        |
| 16.3.6     | Anwendung der Momentenausgleichsverfahren . . . . .   | 192        |
| <u>17.</u> | <u>Ermittlung der Vorspannkraft</u> . . . . .   | <u>197</u> |
| 17.1       | Erforderliche Vorspannkraft bei statisch bestimmten Trägern . . . . .                             | 197        |
| 17.2       | Erforderliche Vorspannkraft für statisch unbestimmte Träger . . . . .                             | 200        |
| 17.3       | Zur zulässigen Spannstahtspannung beim Vorspannen = zul $\sigma_{z,vo}$ . . . . .                 | 200        |
| 17.4       | Spannkraftverluste durch Schwinden und Kriechen - Gebrauchsformeln . . . . .                      | 201        |
| 17.4.1     | Vorbemerkung . . . . .  | 201        |
| 17.4.2     | Gebrauchsformeln für Spannkraftverluste . . . . .   | 201        |
| 17.4.3     | Einfluß von Betonstahleinlagen auf die Spannkraftverluste . . . . .                               | 203        |
| 17.4.4     | Maßgebende Schnitte für Spannkraftverluste . . . . .  | 203        |
| <u>18.</u> | <u>Bemessung für die Tragfähigkeit</u> . . . . .  | <u>205</u> |
| 18.1       | Biegung ohne Zwangsmomente . . . . .  | 205        |
| 18.2       | Biegung mit Zwangsmomenten . . . . .  | 208        |
| 18.2.1     | Stand des Wissens . . . . .   | 208        |
| 18.2.2     | Derzeitige Regel des Nachweises . . . . .   | 209        |
| 18.3       | Biegung ohne Verbund . . . . .  | 210        |
| 18.4       | Querkraft - Schub . . . . .   | 210        |
| 18.4.1     | Platten ohne Schubbewehrung . . . . .   | 211        |
| 18.4.2     | Träger mit Schubbewehrung . . . . .   | 212        |
| 18.4.2.1   | Die erweiterte Fachwerkanalogie . . . . .   | 212        |
| 18.4.2.2   | Bemessung der Schubbewehrung mit Abzugswerten $Q_D$ . . . . .                                     | 213        |
| 18.4.2.3   | Auswirkungen der Querkraften auf den Zuggurt . . . . .  | 216        |
| 18.4.2.4   | Nachweis der Druckstreben . . . . .   | 218        |
| 18.5       | Torsion . . . . .   | 219        |
| <u>19.</u> | <u>Bemessung für die Gebrauchsfähigkeit</u> . . . . .   | <u>223</u> |
| 19.1       | Begrenzung der Verformungen . . . . .   | 223        |
| 19.2       | Begrenzung der Rißbreiten . . . . .   | 223        |
| 19.2.1     | Anforderungen . . . . .   | 223        |
| 19.2.2     | Mindestbewehrungen . . . . .  | 224        |
| 19.2.3     | Rißbreitenbegrenzung, wenn Bewehrung für die Tragfähigkeit erforderlich ist . . . . .             | 228        |
| <u>20.</u> | <u>Verformungen und Umlagerung von Schnittkräften</u> . . . . .                                   | <u>229</u> |
| 20.1       | Verformungen . . . . .  | 229        |
| 20.2       | Umlagerung von Schnittkräften . . . . .   | 230        |

|   |     |
|---|-----|
| <u>21. Konstruktive Regeln</u> . . . . .  | 233 |
| <u>22. Bemerkungen zur Bauausführung und zur Bauüberwachung.</u> . . . . .                                      | 237 |
| <u>23. Grundlagen für die Schwind- und Kriecheinflüsse</u> . . . . .  | 241 |
| 23.1 Ermittlung der Schwind- und Kriechmaße nach DIN 4227, Ausgabe 1979   | 241 |
| 23.2 Betondehnungen unter veränderlichen Betonspannungen . . . . .  | 247 |
| 23.2.1 Bezeichnungen . . . . .  | 247 |
| 23.2.2 Der allgemeine Ansatz . . . . .  | 248 |
| 23.2.3 Das Verfahren mit dem Relaxationskennwert (Alterungsbeiwert)<br>nach Trost, Zerna, Bazant . . . . .      | 248 |
| 23.2.4 Erweiterte Dischinger-Gleichung nach Rüschi, Jungwirth,<br>Kupfer . . . . .                              | 250 |
| 23.3 Berechnung des Spannungsabfalls in Spanngliedern mit Verbund . . . . .                                     | 252 |
| 23.3.1 Verfahren mit dem Relaxationskennwert. . . . .   | 252 |
| 23.3.2 Verfahren mit der erweiterten Dischinger-Gleichung . . . . .   | 254 |
| 23.4 Einfach statisch unbestimmtes System aus Beton und Stahl . . . . .   | 255 |
| 23.4.1 Verfahren mit dem Relaxationskennwert . . . . .  | 255 |
| 23.4.2 Verfahren mit der erweiterten Dischinger-Gleichung . . . . .   | 256 |
| 23.4.3 Drei Beispiele für die Anwendung der $C_g$ , $C_r$ , $C_S$ -Werte . . . . .                              | 258 |
| 23.4.3.1 Statisch unbestimmtes, homogenes Betontragwerk . . . . .   | 258 |
| 23.4.3.2 Mittig gedrücktes, bewehrtes Betonprisma . . . . .   | 259 |
| 23.4.3.3 Spannungsabfall in einem Spannglied . . . . .  | 260 |
| 23.5 Verfahren mit dem wirksamen Elastizitätsmodul . . . . .  | 262 |
| 23.5.1 Kraftgrößenverfahren . . . . .   | 262 |
| 23.5.2 Weggrößenverfahren . . . . .   | 263 |
| 23.5.3 Verbindung zweier Fertigteilträger, Bauzustände . . . . .  | 264 |
| 23.6 Verbundquerschnitte mit dehn- und biegesteifen Stahlteilquerschnitt . . . . .                              | 270 |
| 23.6.1 Verschiedene Verbundquerschnitte . . . . .   | 270 |
| 23.6.2 Ideelle Querschnittswerte, Verteilungsgrößen nach dem Weg-<br>größenverfahren . . . . .                  | 270 |
| 23.6.3 Umlagerungsgrößen infolge Kriechen und Schwinden des Betons<br>bei statisch bestimmtem Stabwerk. . . . . | 273 |
| 23.6.4 Verfahren mit Kriechfasern von Busemann . . . . .  | 275 |
| 23.6.4.1 Homogener Querschnitt als Zweipunktquerschnitt . . . . .   | 275 |
| 23.6.4.2 Verbundquerschnitt als Zweipunktquerschnitt . . . . .  | 277 |
| 23.6.5 Kraftgrößenverfahren für die Umlagerungsgrößen . . . . .   | 279 |
| <u>24. Nachweis des Grenzzustandes der Tragfähigkeit mit dem Traglastverfahren.</u> . . . . .                   | 281 |
| 24.1 Vorbemerkung . . . . .   | 281 |
| 24.2 Annahmen und Voraussetzungen . . . . .   | 281 |
| 24.2.1 Allgemeines . . . . .  | 281 |
| 24.2.2 Theoretische Grundlagen des Traglastverfahrens . . . . .   | 282 |
| 24.2.3 Rotationsfähigkeit. . . . .  | 284 |
| 24.2.4 Verformungen und Reißbeschränkung. . . . .   | 286 |
| 24.2.5 Zwangsschnittgrößen. . . . .   | 286 |
| 24.3 Anwendung des Traglastverfahrens auf Spannbetontragwerke . . . . .   | 287 |
| 24.3.1 Stabtragwerke . . . . .  | 287 |
| 24.3.2 Gegenüberstellung des bisherigen Sicherheitsnachweises und<br>des Traglastverfahrens . . . . .           | 289 |
| 24.3.3 Flächentragwerke (Platten) . . . . .   | 291 |
| Schrifttumverzeichnis . . . . .   | 293 |