

# Inhaltsverzeichnis

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
|          | <b>Vorwort</b>   | V         |
|          | <b>Autor</b>   | VI        |
| <b>1</b> | <b>Einleitung und Übersicht</b>                          | <b>1</b>  |
| 1.1      | Einführung   | 1         |
| 1.2      | Grundsätzliches  | 4         |
| 1.3      | Bezeichnungen und Annahmen                               | 8         |
| 1.4      | Grundlegende Beziehungen nach Theorie I. Ordnung         | 13        |
| 1.5      | Stabilität und Theorie II. Ordnung                       | 15        |
| 1.6      | Buchinhalt (Übersicht)                                   | 18        |
| 1.7      | Berechnungsbeispiele (Übersicht)                         | 21        |
| 1.8      | Downloads/Software                                       | 25        |
| 1.9      | Hinweise zum Norm-Entwurf DIN EN 1993-1-1:2020-08        | 26        |
| <b>2</b> | <b>Tragverhalten, Berechnungs- und Nachweisverfahren</b> | <b>31</b> |
| 2.1      | Lineares und nichtlineares Tragverhalten                 | 31        |
| 2.2      | Nachweisverfahren  | 33        |
| 2.3      | Werkstoff Stahl  | 36        |
| 2.4      | Teilsicherheitsbeiwerte $\gamma_M$                       | 38        |
| 2.5      | Querschnittsklassen                                      | 39        |
| 2.6      | Definition der Stabilitätsfälle                          | 43        |
| 2.7      | Nachweise für stabilitätsgefährdete Tragwerke            | 47        |
| 2.8      | Weitere Erläuterungen zum Verständnis                    | 53        |
| 2.8.1    | Geometrische Imperfektionen                              | 54        |
| 2.8.2    | Lineare und nichtlineare Tragwerksverformungen           | 55        |
| 2.8.3    | Beschränkte Superposition bei Theorie II. Ordnung        | 56        |
| 2.8.4    | Entlastung durch Zugnormalkräfte                         | 56        |
| 2.8.5    | Fließzonen   | 57        |
| 2.8.6    | Eigenspannungen  | 58        |
| 2.8.7    | Nachweisschnittgrößen                                    | 60        |
| 2.9      | Berechnungen nach der Fließzonentheorie                  | 61        |
| 2.10     | Geometrisch nichtlineare Berechnungen                    | 63        |
| 2.10.1   | Hinweise zur Notwendigkeit                               | 63        |
| 2.10.2   | Berechnungsbeispiel zum Biegeknicken                     | 63        |
| 2.10.3   | Berechnungsbeispiel zum Biegedrillknicken                | 65        |
| 2.11     | Baustatisches Lehrbeispiel Zweigelenkrahmen              | 67        |
| 2.11.1   | Einleitung   | 67        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 2.11.2   | Mögliche und sinnvolle Nachweismethoden                                      | 68         |
| 2.11.3   | Biegeknicken in der Rahmenebene  | 71         |
| 2.11.4   | Biegedrillknicken und Biegeknicken um die schwache Achse                     | 76         |
| 2.11.5   | Rahmenecken – Konstruktion und Tragfähigkeit                                 | 81         |
| 2.11.6   | Gabellager und Wölbbehinderungen   | 85         |
| 2.11.7   | Alternative Rahmennachweise mit Abminderungsfaktoren                         | 90         |
| 2.11.8   | Grenztragfähigkeit des Zweigelenkrahmens                                     | 94         |
| 2.12     | Genauigkeit der Nachweisverfahren  | 99         |
| 2.12.1   | Vorbemerkungen   | 99         |
| 2.12.2   | Nachweise mit Abminderungsfaktoren   | 100        |
| 2.12.3   | Ersatzimperfektionsverfahren   | 104        |
| 2.12.4   | Fließzonentheorie  | 105        |
| <b>3</b> | <b>Nachweise zum Biegeknicken mit Abminderungsfaktoren <math>\chi</math></b> | <b>106</b> |
| 3.1      | Übersicht  | 106        |
| 3.2      | Druckstäbe – Abminderungsfaktoren $\chi$                                     | 108        |
| 3.3      | Druckstäbe mit Biegemomenten – Biegeknicken                                  | 117        |
| 3.4      | Hinweise zum Nachweis von Stäben und Stabwerken                              | 121        |
| 3.5      | Knickzahlen $\omega$ nach DIN 4114   | 126        |
| <b>4</b> | <b>Stabilitätsproblem Biegeknicken</b>                                       | <b>128</b> |
| 4.1      | Ziele  | 128        |
| 4.2      | Stabiles Gleichgewicht   | 129        |
| 4.3      | Knickbedingungen   | 130        |
| 4.4      | Eulerfälle I und IV  | 134        |
| 4.5      | Knickbiegelinien und Knicklängen   | 137        |
| 4.6      | Euler'sche Knickspannung   | 140        |
| 4.7      | Hinweise zur Berechnung von $N_{cr}$   | 142        |
| 4.8      | Ersatz von Tragwerksteilen durch Federn                                      | 147        |
| 4.9      | Druckstäbe mit Federn an den Enden   | 151        |
| 4.10     | Lösen von Knickbedingungen   | 159        |
| 4.11     | Druckstab mit Wegfeder in Feldmitte  | 162        |
| 4.12     | Elastisch gebettete Druckstäbe   | 164        |
| 4.13     | Poltreue Normalkräfte/Pendelstützen  | 172        |
| 4.14     | Knicklängen für ausgewählte Systeme  | 181        |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| <b>5</b> | <b>Nachweise zum Biegedrillknicken mit Abminderungsfaktoren</b> | <b>187</b> |
| 5.1      | Übersicht   | 187        |
| 5.2      | Planmäßige Biegemomente – Abminderungsfaktoren                  | 189        |
| 5.3      | Planmäßige Biegemomente und Druckkräfte                         | 203        |
| 5.4      | Allgemeines Nachweisverfahren für Bauteile                      | 210        |
| 5.5      | Nachweis von Druckgurten als Druckstab                          | 213        |
| 5.6      | Hinweise zur Nachweisführung                                    | 217        |
| 5.6.1    | Prinzipielle Vorgehensweise                                     | 217        |
| 5.6.2    | Stäbe ohne Biegedrillknickgefahr                                | 217        |
| 5.6.3    | Maßgebende Nachweisstellen                                      | 219        |
| 5.6.4    | Aufteilung in Teilsysteme                                       | 221        |
| <br>     |   |            |
| <b>6</b> | <b>Stabilitätsproblem Biegedrillknicken</b>                     | <b>223</b> |
| 6.1      | Übersicht   | 223        |
| 6.2      | Berechnung von $M_{cr,y}$                                       | 225        |
| 6.3      | Aufteilung in Teilsysteme                                       | 228        |
| 6.4      | Träger mit Randmomenten   | 230        |
| 6.5      | Kragträger  | 235        |
| 6.6      | Träger mit einfachsymmetrischen I-Querschnitten                 | 237        |
| 6.7      | Seitlich abgestützte Träger                                     | 239        |
| 6.8      | Drill- und Biegedrillknicken bei Druckstäben                    | 244        |
| 6.9      | Herleitung von Berechnungsformeln                               | 248        |
| <br>     |   |            |
| <b>7</b> | <b>Theorie II. Ordnung mit Ersatzimperfektionen</b>             | <b>254</b> |
| 7.1      | Grundsätzliches   | 254        |
| 7.2      | Nachweisführung   | 256        |
| 7.3      | Ersatzimperfektionen  | 257        |
| 7.3.1    | Grundlagen  | 257        |
| 7.3.2    | Ersatzimperfektionen für Biegeknicken                           | 257        |
| 7.3.3    | Ersatzimperfektionen für Biegedrillknicken                      | 260        |
| 7.3.4    | Imperfektionen zur Berechnung aussteifender Systeme             | 261        |
| 7.3.5    | Hinweise zum Ansatz der Ersatzimperfektionen                    | 262        |
| 7.4      | Schnittgrößen nach Theorie II. Ordnung                          | 266        |
| 7.4.1    | Berechnungen  | 266        |
| 7.4.2    | Erläuterungen zum Verständnis                                   | 267        |
| 7.5      | Nachweis ausreichender Querschnittstragfähigkeit                | 270        |
| 7.5.1    | Allgemeines   | 270        |
| 7.5.2    | Nachweise mit Normal- und Schubspannungen                       | 271        |
| 7.5.3    | Ermittlung von Spannungen (Elastizitätstheorie)                 | 273        |
| 7.5.4    | Lineare Interaktionsbeziehungen                                 | 276        |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 7.5.5    | Plastische Querschnittstragfähigkeit – I-Querschnitte       | 278        |
| 7.5.6    | Plastische Querschnittstragfähigkeit – Weitere Querschnitte | 288        |
| 7.6      | Berechnungsbeispiele  | 290        |
| 7.6.1    | Vorbemerkungen  | 290        |
| 7.6.2    | Stütze HEB 200  | 290        |
| 7.6.3    | Stütze HEA 140 mit planmäßiger Biegung                      | 291        |
| 7.6.4    | Am Fußpunkt eingespannte Stütze IPE 300                     | 293        |
| 7.6.5    | Einfeldträger IPE 400 mit planmäßiger Biegung               | 295        |
| 7.6.6    | Zweifeldträger IPE 400 mit planmäßiger Biegung              | 298        |
| 7.6.7    | Träger HEB 220 mit planmäßiger Torsion                      | 301        |
| 7.6.8    | Träger mit einfachsymmetrischem I-Querschnitt               | 302        |
| 7.6.9    | Träger aus einem UPE-Profil                                 | 304        |
| 7.6.10   | Kragträger mit planmäßiger Biegung                          | 307        |
| <b>8</b> | <b>Theorie II. Ordnung für Biegung mit Normalkraft</b>      | <b>310</b> |
| 8.1      | Problemstellung und Ziele                                   | 310        |
| 8.2      | Grundlegende Zusammenhänge                                  | 312        |
| 8.3      | Prinzip der virtuellen Arbeit                               | 316        |
| 8.4      | Differentialgleichungen und Randbedingungen                 | 321        |
| 8.5      | Lösung der Differentialgleichungen                          | 324        |
| 8.6      | Weggrößenverfahren  | 333        |
| 8.7      | Vergrößerungsfaktoren                                       | 339        |
| 8.8      | Iterative Berechnungen                                      | 353        |
| 8.9      | Tragverhalten nach Theorie II. Ordnung                      | 355        |
| 8.9.1    | Ziele   | 355        |
| 8.9.2    | Biegebeanspruchte Stäbe mit Druck- oder Zugnormalkräften    | 355        |
| 8.9.3    | Druckstab mit Randmomenten                                  | 357        |
| 8.9.4    | Maßgebende Bemessungspunkte und Laststellungen              | 359        |
| 8.9.5    | Seitlich verschiebbliche Rahmen                             | 361        |
| 8.9.6    | Seitlich unverschiebbliche Rahmen                           | 364        |
| 8.9.7    | Erhöhte Biegemomente in druckkraftfreien Teilen             | 368        |
| 8.10     | Ersatzbelastungsverfahren für verschiebbliche Rahmen        | 369        |
| <b>9</b> | <b>Theorie II. Ordnung für beliebige Beanspruchungen</b>    | <b>380</b> |
| 9.1      | Vorbemerkungen  | 380        |
| 9.2      | Spannungen und Dehnungen                                    | 380        |
| 9.3      | Verschiebungen $u$ , $v$ und $w$                            | 383        |
| 9.4      | Virtuelle Arbeit  | 388        |
| 9.5      | Differentialgleichungen und Randbedingungen                 | 394        |
| 9.6      | Schnittgrößen   | 396        |

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| 9.7       | Berechnungsablauf und Lösungsmethoden                             | 400        |
| 9.8       | Hinweise zum Tragverhalten  | 403        |
| 9.8.1     | Übersicht   | 403        |
| 9.8.2     | Nachweis zum Biegedrillknicken mit Formeln                        | 403        |
| 9.8.3     | Einfluss der Querschnittsform                                     | 406        |
| 9.8.4     | Biegedrillknicken mit planmäßiger Torsion                         | 408        |
| 9.8.5     | Realistische Lastangriffspunkte                                   | 409        |
| 9.8.6     | Einfluss von Trägerüberständen                                    | 411        |
| <b>10</b> | <b>Aussteifung und Stabilisierung</b>                             | <b>412</b> |
| 10.1      | Aussteifende Bauteile   | 412        |
| 10.2      | Aussteifung von Gebäuden  | 413        |
| 10.3      | Stabilisierung durch Abstützungen                                 | 417        |
| 10.3.1    | Halle mit aussteifenden Verbänden                                 | 417        |
| 10.3.2    | Ableitung planmäßiger Horizontallasten                            | 418        |
| 10.3.3    | Ableitung von Abtriebskräften                                     | 420        |
| 10.3.4    | Abstützende Bauteile  | 420        |
| 10.3.5    | Schubfelder   | 421        |
| 10.4      | Stabilisierung durch Behinderung der Verdrehungen                 | 424        |
| 10.5      | Stabilisierung durch konstruktive Details                         | 429        |
| 10.6      | Ausführungsbeispiel Sporthalle                                    | 431        |
| 10.6.1    | Konstruktion  | 431        |
| 10.6.2    | Stabilität und Tragfähigkeit der inneren Dachbinder               | 432        |
| 10.6.3    | Nachweis des Schubfeldes  | 435        |
| 10.6.4    | Tragfähigkeit der Dachbinder in den Giebelwänden                  | 437        |
| 10.7      | Ausführungsbeispiel eingeschossige Halle                          | 438        |
| 10.7.1    | Vorbemerkungen  | 438        |
| 10.7.2    | Zweigelenkrahmen in der Rahmenebene                               | 438        |
| 10.7.3    | Tragfähigkeit der Rahmenstiele                                    | 444        |
| 10.7.4    | Tragfähigkeit der Rahmenriegel                                    | 446        |
| 10.7.5    | Dachverbände  | 454        |
| 10.7.6    | Wandverbände  | 458        |
| <b>11</b> | <b>Fließzonentheorie – Berechnungen, Tragverhalten, Nachweise</b> | <b>459</b> |
| 11.1      | Einführung  | 459        |
| 11.1.1    | Vorbemerkungen  | 459        |
| 11.1.2    | Grundlegende Einführungsbeispiele und Erläuterungen               | 460        |
| 11.1.3    | Hinweise zu geometrisch nichtlinearen Berechnungen                | 462        |
| 11.2      | Auswirkungen von Fließzonen auf die Tragfähigkeit                 | 462        |
| 11.2.1    | Vorbemerkungen  | 462        |

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| 11.2.2    | Tragfähigkeit nach Theorie I. Ordnung – Fließzonen           | 463        |
| 11.2.3    | Biegeknicken um die starke Achse – Tragverhalten             | 466        |
| 11.2.4    | Biegeknicken um die schwache Achse – Tragverhalten           | 467        |
| 11.2.5    | Biegedrillknicken– Tragverhalten                             | 468        |
| 11.2.6    | Biegung und Torsion eines Versuchsträgers IPE 200            | 470        |
| 11.2.7    | Zweiachsig außermittig belastete Versuchsstütze HEB 200      | 473        |
| 11.2.8    | Biegung und Torsion eines Versuchsträgers UPE 200            | 478        |
| 11.3      | Berechnungen mit dem Programm FE-STAB-FZ                     | 480        |
| 11.3.1    | Anwendungsbereiche   | 480        |
| 11.3.2    | Fließzonentheorie auf Grundlage der DIN EN 1993              | 481        |
| 11.3.3    | Imperfektionen   | 483        |
| 11.3.4    | Werkstoffgesetz  | 487        |
| 11.3.5    | Querschnittskennwerte und Ermittlung von Fließzonen          | 487        |
| 11.3.6    | Einfluss von Schubspannungen                                 | 492        |
| 11.3.7    | Inkrementell-iterative Systemberechnung                      | 492        |
| 11.3.8    | Beurteilung der Ergebnisse/Kontrollen                        | 495        |
| 11.4      | Berechnungsbeispiele   | 496        |
| 11.4.1    | Vorbemerkungen   | 496        |
| 11.4.2    | Stütze HEA 140 mit Druckkraft und planmäßiger Biegung        | 497        |
| 11.4.3    | Einfeldträger IPE 400 mit planmäßiger Biegung                | 499        |
| 11.4.4    | Zweifeldträger IPE 400 mit planmäßiger Biegung               | 500        |
| 11.4.5    | Einfeldträger IPE 300 mit Druckkraft und planmäßiger Biegung | 503        |
| 11.4.6    | Stütze IPE 300 mit Einspannung am Stützenfuß                 | 505        |
| 11.4.7    | Zweifeldrige Giebelwandeckstütze                             | 507        |
| 11.4.8    | Zweifeldriger Kranbahnträger HEB 300                         | 509        |
| <b>12</b> | <b>Stabilitätsproblem Plattenbeulen und Beulnachweise</b>    | <b>513</b> |
| 12.1      | Problemstellung  | 513        |
| 12.2      | Grundlagen für Beulnachweise                                 | 516        |
| 12.2.1    | Vergleich mit dem Biegeknicken                               | 516        |
| 12.2.2    | Beulfelder in Tragwerken                                     | 516        |
| 12.2.3    | Linearisierte Beultheorie                                    | 519        |
| 12.3      | Plattenbeulnachweise nach DIN EN 1993-1-5                    | 522        |
| 12.4      | Rechteckplatten ohne Steifen                                 | 529        |
| 12.4.1    | Ideale Beulspannungen  | 529        |
| 12.4.2    | Konstante Randspannungen $\sigma_x$                          | 531        |
| 12.4.3    | Linear veränderliche Randspannungen $\sigma_x$               | 533        |
| 12.4.4    | Schubspannungen  | 535        |
| 12.4.5    | Beulfelder mit unterschiedlichen Randbedingungen             | 536        |
| 12.5      | Ausgesteifte Beulfelder                                      | 538        |
| 12.5.1    | Steifentypen   | 538        |

|        |  |     |
|--------|--|-----|
| 12.5.2 | Steifenanordnung                                 | 538 |
| 12.5.3 | Beulwerte für ausgesteifte Beulfelder            | 540 |
| 12.6   | Wichtige Konstruktionsdetails                    | 545 |
| 12.7   | Überkritisches Tragverhalten                     | 547 |
| 12.8   | Berechnungsbeispiele zum Plattenbeulen           | 550 |
| 12.8.1 | Vorbemerkungen                                   | 550 |
| 12.8.2 | Geschweißter Träger mit I-Querschnitt            | 550 |
| 12.8.3 | Geschweißter Hohlkastenträger                    | 552 |
| 12.8.4 | Bodenblech einer Geh- und Radwegbrücke           | 555 |
| 12.8.5 | Stegblech eines Vollwandträgers mit Längssteifen | 558 |

|                             |            |
|-----------------------------|------------|
| <b>Literaturverzeichnis</b> | <b>568</b> |
|-----------------------------|------------|

|                             |            |
|-----------------------------|------------|
| <b>Stichwortverzeichnis</b> | <b>574</b> |
|-----------------------------|------------|