

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	V
<b>Autor</b>	VI
<b>1 Einleitung und Übersicht</b>	1
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 Tragverhalten, Berechnungs- und Nachweisverfahren</b>	31
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 Biegendrillknicken	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
<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
<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

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>XIII</b>
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>