
Inhaltsverzeichnis

1	Übersicht	1
	Literatur	2
2	Materialnichtlinearität	3
2.1	Grenztragfähigkeit des Querschnitts	4
2.1.1	Rechteckquerschnitt – Vollplastizierung	4
2.1.2	Teilplastizierung	6
2.1.3	Schnittgrößeninteraktion N + M beim Rechteckquerschnitt	9
2.1.4	Schnittgrößeninteraktion V + M beim Rechteckquerschnitt	11
2.1.5	Interaktionsgleichungen für andere Querschnitte	13
2.1.6	Interaktionen im Programm AQB	13
2.2	Grenztragfähigkeit des Systems	14
2.2.1	Schrittweise elastische Berechnung der Traglast mit der Fließgelenktheorie	15
2.2.2	Traglastsätze	19
2.2.3	Größe der Fließzonen	25
2.3	Materialnichtlinearität mit Finiten Elementen	30
2.3.1	Zweifeldträger, linear elastisch	30
2.3.2	Nachweis elastisch-plastisch mit SOFiSTiK	34
2.3.3	Fließgelenktheorie	37
2.3.4	Fließzonentheorie	42
	Literatur	60
3	Geometrische Nichtlinearität	61
3.1	Unterschiedliche Berechnungsverfahren	61
3.1.1	Berechnung 1: Theorie I. Ordnung	68
3.1.2	Berechnung 2: Theorie I. Ordnung, 1 cm Auslenkung	69
3.1.3	Berechnung 3: Theorie I. Ordnung, Vorspannung	71
3.1.4	Berechnung 4: Theorie I. Ordnung, Vorspannung und 1 cm Auslenkung	72

3.1.5	Berechnung 5: Theorie II. Ordnung	73
3.1.6	Berechnung 6: Theorie II. Ordnung, Vorspannung	75
3.1.7	Berechnung 7: Theorie II. Ordnung, 1 cm Auslenkung	78
3.1.8	Berechnung 8: Theorie III. Ordnung (geometrisch nichtlinear)	83
3.1.9	Ergebnisse	89
3.1.10	Berechnung 9: Stabelemente	90
3.2	Verzweigungsprobleme	92
3.2.1	Berechnung 1: Euler-Fall II mit nur einem Stabelement, linear	96
3.2.2	Berechnung 2: Euler-Fall II mit einem bzw. 10 Stabelementen, nichtlinear	98
3.2.3	Berechnung 3: Euler-Fall II mit 10 Stabelementen, Kurvenverfolgung	99
3.2.4	Linearisierte Eigenwertanalyse	102
3.2.5	Begleitende Eigenwertanalyse	106
3.2.6	Imperfektes System	110
3.2.7	Traglast unter Berücksichtigung des nichtlinearen Materialverhaltens	117
3.2.8	Die zweite Eigenform als Imperfektion – elastisch	120
3.2.9	Zweifeldträger unter Druck mit Querlast	124
3.2.10	Imperfekter Rahmen	135
3.2.11	Imperfekter Bogen	148
3.2.12	Ausgeknickter Fachwerkbinder	154
3.3	Das Durchschlagproblem	159
3.3.1	Problemstellung und analytische Lösung	159
3.3.2	Berechnung 1: Fachwerkzweischlag	169
3.3.3	Berechnung 2: Stabelemente	178
3.3.4	Berechnung 3: Feinere Unterteilung	179
3.3.5	Eigenwertanalyse	181
3.3.6	Durchschlag maßgebend	188
3.3.7	Interaktion der Versagensmoden	193
3.3.8	Praxisbeispiel Gitterschale	199
3.4	Imperfektionen – Imperfektionsempfindlichkeit	200
3.4.1	Form der Imperfektion	201
3.4.2	Imperfektion als Kombination verschiedener Eigenformen	204
3.4.3	Normierung	205
3.4.4	Skalierung der Ersatzimperfektion	206
3.4.5	Imperfektionsempfindlichkeit	212
	Literatur	214
4	Stahlbetonstütze	217
4.1	Lineare Berechnung und Regelbemessung	219
4.2	Berechnung nach Theorie II. Ordnung mit linearem Materialgesetz	223

4.3	Berücksichtigung von Material- und Geometrie-Nichtlinearität	225
4.3.1	Verfahren der „Doppelten Buchführung“ nach DIN 1992-1-1 (2011), 5.8.6	226
4.3.2	Nichtlineare Berechnung mit veränderter Grundbewehrung . . .	232
4.3.3	γ_R -Verfahren nach DIN 1992-1-1 (2011), 5.7, (NA.7 bis 15) . .	232
	Literatur	237
5	Biegedrillknicken	239
5.1	Einführungsbeispiel	239
5.1.1	Handberechnung nach dem Ersatzstabverfahren	240
5.1.2	Spannungen am perfekten System	241
5.1.3	Spannungen am imperfekten System bei elastischer Querschnittsausnutzung mit $q = 6,8 \text{ kN/m}$	242
5.1.4	Imperfektes System nach Fließzonentheorie mit $q = 7,0 \text{ kN/m}$. .	244
5.1.5	Imperfektes System bei plastischer Querschnittsausnutzung mit $q = 7,0 \text{ kN/m}$ und Kurvenverfolgung mit vollplastischer Schnittgrößeninteraktion	248
5.1.6	Imperfektes System nach Fließzonentheorie mit $q = 7,0 \text{ kN/m}$ und unechter Kurvenverfolgung	252
5.1.7	Imperfektes System elastisch-plastisch berechnet, voreingestellte Interaktion	253
5.1.8	Imperfektes System plastisch-plastisch berechnet, mit Nachverfestigung	257
5.1.9	Imperfektes System plastisch-plastisch berechnet, mit Nachverfestigung nach Theorie II. Ordnung statt Theorie III. Ordnung	257
5.1.10	Ersatzstabverfahren	258
5.1.11	Zusammenfassung	262
5.2	Vergleich Ersatzstabverfahren – Theorie II. Ordnung –	263
5.3	Biegedrillknicknachweis eines Rahmenriegels	266
5.3.1	Modellierung der Vouten	266
5.3.2	Schnittkraftermittlung	272
5.3.3	Berechnung am geraden Träger nach Biegetorsionstheorie II. Ordnung	278
5.3.4	Grundsystem	279
5.3.5	Imperfektion aus Eigenwertanalyse unter Berücksichtigung der Wölbkrafttorsion	281
5.3.6	Aussteifung durch einen Verband	283
5.3.7	Einfluss der Drehbettung aus den Pfetten	286
5.3.8	Einfluss der Drehbettung aus zusätzlichen Pfetten	291
5.3.9	Imperfektionsempfindlichkeit	292
5.3.10	Eigenwertanalyse ohne Berücksichtigung der Wölbkrafttorsion .	293

5.3.11	Biegedrillnicknachweis mit dem Ersatzstabverfahren	295
5.3.12	Anschlusskräfte und Anschlussmomente	295
5.4	Biegedrillknicknachweis am Rahmen	296
5.5	Berechnung am Gesamtsystem	300
	Literatur	300
6	Pendelstützen	303
6.1	Hallenrahmen	303
6.2	Berechnung nach Theorie I. Ordnung	306
6.3	Berechnung nach Theorie II. Ordnung ohne Imperfektionen	307
6.4	Berechnung nach Theorie II. Ordnung mit Imperfektionen	308
6.5	Pendelstützen durch Lager ersetzt	310
6.6	Ergebnisse	312
6.7	Praxisbeispiel: Stahlhalle	314
	Literatur	316
7	Formfindung	317
7.1	Stützlinienbogen	319
7.2	Schalen	328
	Literatur	333
8	Schalenbeulen	335
8.1	Spannungsbasierter Nachweis	338
8.1.1	Axialdruck	338
8.1.2	Umfangsdruck	343
8.1.3	Nachweis	352
8.2	LBA/MNA-Nachweis	354
8.2.1	Axialdruck	355
8.2.2	Umfangsdruck	360
8.2.3	Nachweis	369
8.3	GMNIA-Berechnung	369
8.4	Ergebnis	370
	Literatur	371
9	Nichtlinearität aus Systemänderung	373
9.1	Einführungsbeispiel	373
9.2	Vorgespannter Fachwerkträger	378
9.3	Praxisbeispiel Treppenhausgründung	383
9.4	Bauablauf	385
9.4.1	Vergleichsberechnung am zweigeschossigen System	388
9.4.2	Mehrgeschossiges Beispiel	394
	Literatur	407

10	Anhang: Numerische Methoden	409
10.1	Iterationsverfahren zur Lösung nichtlinearer Gleichungssysteme	409
10.1.1	Fixpunktiteration	410
10.1.2	Newton-Raphson-Verfahren	425
10.1.3	Konvergenzkriterien, Abbruch der Iteration	437
10.1.4	Beispiel zur Newton-Raphson-Iteration	440
10.1.5	Das Newton-Raphson-Verfahren in der Statik	451
10.1.6	Line-Search-Verfahren	454
10.1.7	Quasi-Newton-Verfahren	468
10.1.8	Iterationsverfahren in SOFiSTiK – ASE	478
10.2	Eigenwertprobleme	480
10.2.1	Einführungsbeispiel	480
10.2.2	Lösung der Eigenwertprobleme mit dem charakteristischen Polynom	484
10.2.3	Eigenwerte und Stabilität	489
10.2.4	Koordinatentransformation	490
10.2.5	Transformation in den Eigenraum	491
10.2.6	Mathematische Erkenntnisse	493
10.2.7	Eigenwerte in der Statik	495
10.2.8	Zusammenhang mit der Determinante	499
10.2.9	Numerische Eigenwertberechnung	499
10.2.10	Beispiele zur Eigenwertberechnung	508
10.3	Kurvenverfolgung	522
10.3.1	Ausgangsüberlegung	522
10.3.2	Kurvenverfolgung	524
10.3.3	Kritische Punkte	526
	Literatur	527
	Stichwortverzeichnis	529