

Schriftenreihe Stahlbau – RWTH Aachen

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Markus Feldmann

Gründer:

Prof. Dr.-Ing. Dr.h.c. Gerhard Sedlacek

Heft 77

Max Gündel

**Zuverlässigkeitsanalysen zur Kapazitätsbemessung von
Stahlrahmen**

D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2013)

Shaker Verlag
Aachen 2013

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2013)

Copyright Shaker Verlag 2013

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-2343-5

ISSN 0722-1037

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort des Herausgebers

Obwohl die dissipative Bemessung, insbesondere bei Stahl- und Stahlverbundbauwerken, ein zentrales Merkmal der Bemessung moderner Erdbebennormung, wie die DIN EN 1998-1, ist, enthalten die derzeitigen europäischen Liefnormen von Baustählen keine hinreichenden oberen Abgrenzungen der Festigkeitseigenschaften. Dies führt zu Beschränkungen bei der Anwendung der dissipativen Bemessungsansätze. Denn neben den üblichen statischen Nachweisen ist die Sicherstellung der planmäßig optimierten Verteilung der plastifizierenden Zonen unter Berücksichtigung etwaiger Überfestigkeiten essentiell für die praktische Anwendung und Ausnutzung dieser Auslegungsart.

Da Zweifel bestanden, ob die vorhandenen Kapazitätsregeln in DIN EN 1998-1 weiterhin eine ausreichende Sicherheit darbieten oder ob Festigkeitsklassen nach oben hin begrenzt werden müssen, hat sich Herr Max Gündel dankenswerterweise dieser Fragestellung angenommen und sie für Stahlrahmen anhand von Zuverlässigkeitsanalysen untersucht. Die Ergebnisse dieser Arbeit beziehen sich auf die Sicherstellung des gewünschten Versagensmechanismus, den Rotationsnachweis sowie die festigkeitsklassenabhängige Vermeidung negativer Auswirkungen von Materialüberfestigkeiten und dienen der direkten Verwendung in CEN/TC 250/SC8.

Die Arbeiten wurden innerhalb des RFCS-Projekts "OPUS-Optimizing the seismic performance of steel and steel-concrete structures by standardizing material quality control" von der Europäischen Kommission gefördert, wofür ausdrücklich zu danken ist.

Dank gebührt auch Herrn Prof. ir. Ton Vrouwenvelder von der TU Delft für die Übernahme des Korreferats.

Aachen, im Oktober 2013

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Feldmann

Kurzfassung

Die plastische Bemessung von Stahlrahmen gegen Erdbeben erfordert die Kontrolle des plastischen Mechanismus in Bezug auf Lage, Tragfähigkeit und Verformungsvermögen. Dies wird durch Regeln der Kapazitätsbemessung sichergestellt, indem für dissipative Elemente ein ausreichendes Verformungsvermögen nachzuweisen ist und nichtdissipative Elemente so bemessen werden, dass sie genügend Überfestigkeit gegenüber der plastischen Tragfähigkeit der dissipativen Elemente besitzen. Beides wird wesentlich von der tatsächlich vorhandenen Streckgrenze beeinflusst. Eine hohe Streckgrenze im dissipativen Element kann dabei das Sicherheitsniveau herabsetzen, da dessen Verformungsvermögen verringert werden kann und die Tragfähigkeitsanforderung an die nichtdissipativen Bauteile steigt.

Die statistische Auswertung der Streckgrenze von Baustählen europäischer Hersteller zeigt, dass die tatsächlich vorhandene Streckgrenze teilweise wesentlich höher als ihr Nennwert ist. Dies hat Zweifel hervorgerufen, ob die vorhandenen Kapazitätsregeln in DIN EN 1998-1 weiterhin eine ausreichende Sicherheit gewährleisten oder ob eine obere Begrenzung der Streckgrenze in den Produktionsnormen erforderlich ist. Diese Fragestellung wurde für Stahlrahmen bezüglich der erforderlichen Stützenüberfestigkeit, des Rotationsnachweises dissipativer Bauteile und des Tragfähigkeitsnachweises nichtdissipativer Anschlüsse anhand von Zuverlässigkeitsanalysen untersucht.

Die Zuverlässigkeitsanalysen wurden mittels nichtlinearer statischer Verfahren (pushover-Berechnungen) durchgeführt. Hierfür wurde ein probabilistisches Modell für die Erdbebeneinwirkung für Tragwerke mit mittlerer bis langer Eigenperiode entwickelt, welches die Verteilung der Stockwerkskräfte, die Zieldachverschiebung und Rotationsspektren umfasst. Ferner wurden als Basisvariablen die Streckgrenze, die Querschnittsabmessungen und die Modellunsicherheiten der zyklischen Rotationskapazität sowie der Tragfähigkeit nichtdissipativer Anschlüsse berücksichtigt. Die dafür erforderlichen probabilistischen Modelle wurden anhand von Messdaten und Versuchsergebnissen hergeleitet.

Die Ergebnisse der Zuverlässigkeitsanalysen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Das plastische Systemverhalten wird im Wesentlichen durch die Streuung der Erdbebeneinwirkung bestimmt; der Einfluss der Verteilung der Streckgrenze ist vernachlässigbar. Eine Stützenüberfestigkeit beeinflusst das Systemverhalten positiv, allerdings ist durch die nach DIN EN 1998-1 geforderte Stützenüberfestigkeit von 1,3 nicht sichergestellt, dass die Auf-

tretenswahrscheinlichkeit des erwünschten globalen Mechanismus größer als die Auftretenswahrscheinlichkeit des unerwünschten Stockwerksversagens ist.

- Auf den Rotationsnachweis haben die Erdbebeneinwirkung und die Bauwerksparameter einen großen Einfluss; die Streckgrenze ist hingegen von geringer Bedeutung. Das Zuverlässigkeitsniveau des Rotationsnachweises ist für Walzprofile in einigen praxisrelevanten Parameterkonfigurationen nicht ausreichend, wenn keine Begrenzung der Rotationen erfolgt. Hierfür ist ein Nachweis der maximalen Stockwerksschiefstellungen in einer pushover-Berechnung geeigneter als das Kriterium zur gegenseitigen Stockwerksverschiebung nach DIN EN 1998-1.
- Die Zuverlässigkeit nichtdissipativer Anschlüsse ist weitestgehend unabhängig von Last- und Bauwerksparametern; die maßgebende Zufallsvariable ist die Streckgrenze. Eine ausreichende Zuverlässigkeit ist gewährleistet, wenn im Tragfähigkeitsnachweis für nicht-dissipative Verbindungen eine Materialüberfestigkeit für das angeschlossene dissipative Bauteil von $\gamma_{ov} = 1,40$ für S235, $\gamma_{ov} = 1,20$ für S355 und $\gamma_{ov} = 1,05$ für S460 berücksichtigt wird.

Summary

The crucial point in the plastic design of moment resisting steel frames against seismic actions is the prediction and control of the formation of plastic mechanism with regard to their location, ultimate resistance and deformation capacity. To this end, so called capacity design rules are applied: dissipative elements require a sufficient deformation capacity under repeated loading; non-dissipative elements are designed with a sufficient overstrength compared to the plastic resistance of dissipative elements. The deformation capacity of dissipative elements as well as the required overstrength of non-dissipative elements is significantly influenced by the actual yield strength of the dissipative member. Material overstrength of dissipative elements may reduce the safety margin, since their deformation capacity can be reduced and the strength demand on the non-dissipative element is increased.

Current statistical evaluations of the yield strength of structural steel from European steel producers show partially a significant overstrength with regard to the nominal values. This raises doubts concerning the reliability of existing capacity design rules in DIN EN 1998-1 or whether an upper bound for yield strength in production standards is required. This question was investigated by reliability analyses for moment resisting steel frames with concern to required column overdesign, rotation capacity of dissipative members and ultimate resistance of non-dissipative connections.

The reliability analyses were performed by means of non-linear static procedures (pushover analyses). For this purpose, a probabilistic seismic load model for structures with medium to large periods was developed including the distribution of horizontal seismic forces, the target roof displacement and the rotation spectrum. Further, yield strength, section dimensions and model uncertainty of cyclic rotation capacity respectively ultimate resistance of non-dissipative connections were considered as random variables. The required probabilistic models were derived based on measurement data and test results.

The main results of the reliability analyses can be summarized as follows:

- The plastic system behaviour is mainly affected by the scattering of the seismic input, while the influence of the distribution of yield strength is negligible. Column overdesign has a positive influence on the system behaviour. However, the recommended column overdesign factor of 1.3 according to DIN EN 1998-1 does not ensure that the probability of the desired global mechanism is higher than the probability of the undesired weak storey mechanism.

- The rotation capacity check is considerably influenced by the seismic input and the structural configuration; in contrast, the influence of yield strength is insignificant. For some hot rolled sections in structural configurations relevant for practice, the reliability of the rotation capacity check is insufficient without limitation of the rotation demand. For this purpose limitation of the interstorey drift determined by a pushover analysis is more appropriate than using the interstorey drift criteria according to DIN EN 1998-1.
- The reliability of non-dissipative connections is rather independent of seismic and structural parameters; the dominant random variable is the yield strength. An adequate reliability for non-dissipative connections is ensured by considering the following material overstrength factors for the attached dissipative members: $\gamma_{ov} = 1.40$ for S235, $\gamma_{ov} = 1.20$ for S355 and $\gamma_{ov} = 1.05$ for S460.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung	1
1.2	Kapazitätsbemessung in der Normung	2
1.3	Zielsetzung und Vorgehen	6
2	Grundlagen der Zuverlässigkeitstheorie	9
2.1	Einführung	9
2.2	Zufallsgrößen und stochastische Prozesse	10
2.2.1	Eindimensionale Zufallsgrößen und ihre Verteilungen	10
2.2.2	Mehrdimensionale Zufallsgrößen	12
2.2.3	Stochastische Prozesse	13
2.3	Parameterschätzung und Modellerstellung	13
2.3.1	Allgemeines	13
2.3.2	Statistische Auswertung von Daten	15
2.3.3	Wahl der Verteilungsfunktion	16
2.3.4	Schätzung der Verteilungsparameter	18
2.3.5	Testverfahren	19
2.4	Allgemeine Methoden der Zuverlässigkeitsanalyse	21
2.4.1	Analytische Lösung und numerische Integration	21
2.4.2	Näherungsverfahren	25
2.4.3	Simulationsverfahren	28
2.4.4	Antwortflächenverfahren	30
2.4.5	Systemanalysen	33
2.4.6	Bewertung der Methoden	35

2.5	Zuverlässigkeitsanalysen im Erdbebeningenieurwesen	39
2.5.1	Niveaufkreuzung von stochastischen Prozessen	39
2.5.2	2000 SAC / FEMA 350 Methode	42
2.5.3	Effektive Fragilitätsanalysen	45
2.6	Zielwert der Zuverlässigkeit	48
2.7	Schlussfolgerungen	51
3	Probabilistische Modelle der Basisvariablen	53
3.1	Einleitung	53
3.2	Mechanische Eigenschaften von Baustahl	53
3.2.1	Kenngößen	53
3.2.2	Probabilistische Modelle	55
3.2.3	Messdaten und Modelle aus der Literatur	56
3.2.4	Statistische Auswertung von Daten der Jahre 1984-1995	59
3.2.5	Statistische Auswertung von Daten der Jahre 2005-2007	62
3.2.6	Verwendetes Modell	65
3.3	Querschnittswerte von Stahlprofilen	68
3.3.1	Zulässige Toleranzen	68
3.3.2	Probabilistische Modelle	69
3.3.3	Statistische Auswertung von Daten der Jahre 1984-1995	69
3.3.4	Verwendete Modelle	72
3.4	Statische Momenten-Rotationskurve	73
3.4.1	Kenngößen der Momenten-Rotationskurve	73
3.4.2	Modelle zur Beschreibung der Momenten-Rotationskurve	76
3.4.3	Statistische Auswertung von Versuchen	80

3.4.4	Verwendetes Modell	85
3.4.5	Übertragbarkeit der Momenten-Rotationskurve auf Rahmen	88
3.5	Zyklisches Momenten-Rotationsverhalten	90
3.5.1	Momenten-Rotationsverhalten unter Erdbebenlasten	90
3.5.2	Modelle zur Beschreibung des Momenten-Rotationsverhaltens	92
3.5.3	Vergleich mit Versuchen	95
3.5.4	Verwendetes Modell	96
3.6	Tragfähigkeit von nichtdissipativen Anschlüssen	99
3.6.1	Anschlüsse in Stahlrahmen	99
3.6.2	Probabilistische Modelle	100
3.6.3	Verwendetes Modell	100
3.7	Seismische Einwirkungen	103
3.7.1	Grundlagen	103
3.7.2	Seismische Gefährdung	103
3.7.3	Erdbebenzeitverläufe	104
3.7.4	Generierung künstlicher Erdbebenzeitverläufe	106
3.8	Schlussfolgerungen	107
4	Nichtlineare Zeitverlaufsberechnungen	111
4.1	Einleitung	111
4.2	Festlegung der Fallbeispiele	111
4.2.1	Bemessung nach DIN EN 1998-1	111
4.2.2	Numerische Modelle	118
4.2.3	Erdbebenzeitverläufe	119
4.3	Ergebnisse für nominelle Tragfähigkeiten	121

4.3.1	Inkrementelle dynamische Analysen	121
4.3.2	Systemverhalten	122
4.3.3	Rotationen	124
4.3.4	Normalkräfte in Stützen	126
4.3.5	Anschlusschnittgrößen	127
4.4	Ergebnisse für streuende Tragfähigkeiten	128
4.4.1	Inkrementelle dynamische Analysen	128
4.4.2	Systemverhalten	129
4.4.3	Rotationen	131
4.4.4	Normalkräfte in Stützen	131
4.4.5	Anschlusschnittgrößen	132
4.5	Schlussfolgerungen	133
5	Probabilistisches Modell der seismischen Einwirkung im Frequenzbereich	137
5.1	Einleitung	137
5.2	Vorgehen	137
5.3	Stochastische Verteilung der Stockwerkskräfte	140
5.3.1	Tragverhalten in den Zeitverlaufsberechnungen	140
5.3.2	Herleitung der stochastischen Parameter	142
5.3.3	Verifikation des Ansatzes mittels Zeitverlaufsberechnungen	148
5.3.4	Parameterbereich für die Stockwerkskräfte	150
5.4	Stochastische Verteilung der Zieldachverschiebung	155
5.4.1	Herleitung der stochastischen Parameter	155
5.4.2	Verifikation des Ansatzes mittels Zeitverlaufsberechnungen	161
5.4.3	Parameterbereich für die Zieldachverschiebung	163

5.5	Stochastische Verteilung der Verformungsamplituden	165
5.5.1	Herleitung der stochastischen Parameter und Verifikation	165
5.5.2	Parameterbereich für die Verformungsspektren	169
5.6	Schlussfolgerungen	170
6	Systemverhalten	173
6.1	Einleitung	173
6.2	Plastisches Systemverhalten von Rahmen	174
6.2.1	Traglast mehrstöckiger Rahmen	174
6.2.2	Generische Bemessung der Rahmen	179
6.3	Stochastische Eigenschaften der Momententragfähigkeit	181
6.3.1	Verteilungsanalysen zur Momententragfähigkeit	181
6.3.2	Korrelation der Bauteiltragfähigkeiten in einer Fließgelenkkette	183
6.3.3	Korrelation der Bauteiltragfähigkeiten in Rahmen	185
6.4	Zuverlässigkeitsuntersuchungen bei deterministischen Lasten	191
6.4.1	Einfluss der Stützenüberfestigkeit auf das Systemverhalten	191
6.4.2	Definition der erforderlichen Stützenüberfestigkeit	194
6.4.3	Erforderliche Stützenüberfestigkeit für deterministische Lasten	195
6.5	Zuverlässigkeitsuntersuchungen bei stochastischen Lasten	198
6.5.1	Einfluss der Stützenüberfestigkeit auf das Systemverhalten	198
6.5.2	Erforderliche Stützenüberfestigkeit für stochastische Lasten	200
6.5.3	Einfluss der Profilwahl auf die erforderliche Stützenüberfestigkeit	202
6.5.4	Aktivierete Stockwerke bei Stützenüberfestigkeit $COF = 1,3$	203
6.6	Schlussfolgerungen	205
7	Rotationsnachweis	209

7.1	Einleitung	209
7.2	Stochastische Eigenschaften der Rotationsanforderung	210
7.2.1	Berechnungsverfahren für die Rotationsanforderungen	210
7.2.2	Generische Bemessung der Rahmen	214
7.2.3	Verteilungsanalysen	217
7.3	Stochastische Eigenschaften der Rotationskapazität	221
7.3.1	Definition der zyklischen Rotationskapazität	221
7.3.2	Momenten-Rotationsverhalten mit nominellen Eingangswerten	222
7.3.3	Verteilungsanalysen zum Momenten-Rotationsverhalten	226
7.4	Zuverlässigkeitsanalysen	229
7.4.1	Vorbemerkungen	229
7.4.2	2000SAC/FEMA350-Methode	230
7.4.3	Definition des Systemversagens	234
7.4.4	Effektive Fragilitätsanalysen	238
7.4.5	Vereinfachter deterministischer Rotationsnachweis	241
7.5	Schlussfolgerungen	243
8	Tragfähigkeitsnachweis nichtdissipativer Anschlüsse	245
8.1	Einleitung	245
8.2	Stochastische Eigenschaften des Anschlussmoments	246
8.2.1	Modell	246
8.2.2	Nominelle Werte des Anschlussmoments	248
8.2.3	Verteilungsanalysen zum Anschlussmoment	249
8.3	Stochastische Eigenschaften der Anschlusstragfähigkeit	252
8.4	Zuverlässigkeitsanalysen	254

8.4.1	Vorbemerkungen	254
8.4.2	Effektive Fragilitätsanalysen	257
8.4.3	Erforderliche Überfestigkeit	260
8.5	Schlussfolgerungen	262
9	Zusammenfassung und Ausblick	265
10	Literaturverzeichnis	269
	Häufig verwendete Formelzeichen	I
Anhang A	Benchmark-Test für Methoden der Zuverlässigkeitstheorie	V
Anhang B	Messdaten und Modelle	VII
B.1	Materialdaten der Jahre 1984-1995	VII
B.2	Materialdaten der Jahre 2005-2007	VIII
B.3	Modelle der statischen Momenten-Rotationskurve	IX
B.4	Modelle des zyklischen Momenten-Rotationsverhaltens	XV
Anhang C	Ergebnisse Zeitverlaufsberechnungen	XVI
C.1	Eigenperioden und Eigenformen	XVI
C.2	Systemverhalten bei nominellen Tragfähigkeiten	XVII
C.3	Rotationen bei nominellen Tragfähigkeiten	XIX
C.4	Systemverhalten bei streuenden Tragfähigkeiten	XX
C.5	Rotationen bei streuenden Tragfähigkeiten	XXII
Anhang D	Zuverlässigkeitsanalysen Systemverhalten	XXIII
D.1	Ablaufschema der verwendeten Matlab-Routinen	XXIII
D.2	Anzahl aktivierter Stockwerke für COF = 1,3	XXIV
Anhang E	Zuverlässigkeitsanalysen zum Rotationsnachweis	XXV

E.1	Ablaufschema der verwendeten Matlab-Routinen	XXV
E.2	Bemessung generischer Rahmen	XXVI
E.3	Lastparameter	XXVI
E.4	Bauwerksparameter	XXVIII
E.5	Mittlere zyklische Rotationskapazitäten	XXXI
Anhang F	Zuverlässigkeitsanalysen zur Anschlussstragfähigkeit	XXXII
F.1	Ablaufschema der verwendeten Matlab-Routinen	XXXII
F.2	Lastparameter	XXXIII
F.3	Bauwerksparameter	XXXV