



INSTITUT FÜR  
BAUINGENIEURWESEN

# ENTWERFEN UND KONSTRUIEREN STAHLBAU

Svetoslav Tonov

Zur zuverlässigkeitstheoretischen Bewertung von bestehenden Stahlhochbauten unter Schnee- und Windeinwirkung

**31**

Heftreihe des Instituts für Bauingenieurwesen  
der Technischen Universität Berlin

Hefreihe des Instituts für Bauingenieurwesen  
Book Series of the Department of Civil Engineering  
Technische Universität Berlin

Herausgeber:

Editors:

Prof. Dr.-Ing. Matthias Barjenbruch

Prof. Dr.-Ing. Karsten Geißler

Prof. Dr.-Ing. Reinhard Hinkelmann

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Huhnt

Prof. Dr.-Ing. Yuri Petryna

Prof. Dr.-Ing. Frank Rackwitz

Prof. Dr. sc. techn. Mike Schlaich

Prof. Dr.-Ing. Volker Schmid

Prof. Dr.-Ing. Matthias Sundermeier

Prof. Dr.-Ing. Frank U. Vogdt

Shaker Verlag

Düren 2021



# **Zur zuverlässigkeitstheoretischen Bewertung von bestehenden Stahlhochbauten unter Schnee- und Windeinwirkung**

vorgelegt von

M.Sc. Svetoslav Tonov

aus Sofia

von der Fakultät VI – Planen Bauen Umwelt

der Technischen Universität Berlin

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften

– Dr.-Ing. –

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Volker Schmid

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Karsten Geißler

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Graf

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 10. Dezember 2020

Berlin 2020



Hefreihe des Instituts für Bauingenieurwesen  
Book Series of the Department of Civil Engineering  
Technische Universität Berlin

Band 31

**Svetoslav Tonov**

**Zur zuverlässigkeitstheoretischen Bewertung von  
bestehenden Stahlhochbauten unter Schnee- und  
Windeinwirkung**

D 83 (Diss. TU Berlin)

Shaker Verlag  
Düren 2021

### **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.: Berlin, Techn. Univ., Diss., 2020

### **Zur zuverlässigkeitstheoretischen Bewertung von bestehenden Stahlhochbauten unter Schnee- und Windeinwirkung**

Dissertationsschrift von Svetoslav Tonov  
Fakultät VI – Planen, Bauen, Umwelt  
der Technischen Universität Berlin

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Karsten Geißler  
Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Graf

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 10.12.2020

Copyright Shaker Verlag 2021

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8239-5

ISSN 1868-8357

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## **Danksagung**

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 2016 bis 2019 am Fachgebiet „Entwerfen und Konstruieren – Stahlbau“ des Institutes für Bauingenieurwesen der Technischen Universität Berlin.

Mein größter Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Karsten Geißler für seine Betreuung und das mir entgegengebrachte Vertrauen sowie für die Übernahme des Erstgutachtens.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Graf möchte ich mich herzlich für die Übernahme des Zweitgutachtens bedanken.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Volker Schmid bin ich dankbar für die Bereitschaft, den Vorsitz des Promotionsausschusses zu übernehmen.

Dem Deutschen Akademischen Austauschdienst danke ich für die finanzielle sowie logistische Unterstützung.

Dank gilt weiter meinen Kolleginnen und Kollegen am Fachgebiet Stahlbau für die produktive Zusammenarbeit und den spanenden fachlichen und persönlichen Austausch. Ich möchte mich weiter bedanken für ihre Bereitschaft, das Korrekturlesen zu übernehmen.

Schließlich möchte ich mich bei meinen Eltern für ihre Ermutigung, diese akademische Herausforderung anzunehmen, und ihre stetige Unterstützung bedanken.





## **Kurzfassung**

Die in Deutschland derzeit gültigen Normen sind für Neubauten konzipiert. Die in den Normen getroffenen Annahmen sind konservativ, um flächendeckend anwendbar zu sein. Die bestehenden Konstruktionen haben besondere Eigenschaften, die sie von Neubauten unterscheiden. Die Möglichkeit, Messungen am Tragwerk durchzuführen, erlaubt es, mehr Informationen über die Tragfähigkeit und die tatsächliche Belastung zu sammeln. Das führt zur Reduktion von Unsicherheiten, was die getrennte Betrachtung der bestehenden Konstruktionen rechtfertigt.

In dieser Arbeit werden Methoden vorgeschlagen, welche die Gewinnung von langfristigen Datenreihen aus kurzfristigen klimatischen Messreihen erlauben, was es ermöglicht, die standortspezifische klimatische Belastung zu ermitteln. Des Weiteren wurden standortspezifische Momentanwertverteilungen für die Schnee- und Windbelastung entwickelt, die eine genauere Untersuchung der Lastkombinationen erlauben. Dadurch konnten fünf Zonen mit ähnlichen Momentanwertverteilungen erkannt werden. Durch probabilistische Berechnungen auf Systemebene wurden modifizierte Sicherheitselemente für die klimatischen Einwirkungen entwickelt. Der Einfluss des Nachweisverfahrens und der Geometrie auf die Sicherheitselemente wurde ebenfalls untersucht. Darüber hinaus wurden Möglichkeiten zur Reduzierung der Leiteinwirkung erarbeitet. Schließlich wurde der Lastfall „außergewöhnliche Schneelast in der Norddeutschen Tiefebene“ standortspezifisch untersucht und für diesen Lastfall wurden alternative Beiwerte entwickelt.

## **Abstract**

The current German construction standards are conceptualized for new buildings. The assumptions, on which the standards are based, are conservative so that they could be applied for a wide range of cases. Existing structures have unique qualities which differentiate them from new ones. The possibility to conduct precise measurements on the structure allows the collection of additional information about the load capacity and the loading. This leads to reduction of the design uncertainties, which justifies separate treatment of existing structures.

In this thesis practical methods for the acquisition of long term data out of short term climate measurements were developed. This allows us to determine the site-specific climatic loads of a structure. Furthermore, site-specific point-in-time distributions for the snow and wind loads were developed. These allow more accurate calculation of load-combinations. Five zones with similar point-in-time distributions were identified. With the help of calibration with probabilistic studies on system level, new modified safety and combination factors for climatic loads for existing structures were developed. The influence of the verification procedure and the geometry on the safety and combination factors were likewise analyzed. Options for the reduction of the leading variable action were also considered. Finally, the load case "Exceptional snowload in the north-German lowland" was site-specifically examined and alternative factors for this load case were developed.



# Inhaltsverzeichnis

Zur zuverlässigkeitstheoretischen Bewertung von bestehenden Stahlhochbauten unter Schnee- und Windeinwirkung.....I

Inhaltsverzeichnis.....I

- 1. Einleitung ..... 1
  - 1.1. Problemstellung ..... 1
  - 1.2. Zielsetzung..... 2
  - 1.3. Vorgehensweise ..... 3
- 2. Grundlagen der Zuverlässigkeitstheorie im Bauwesen ..... 5
  - 2.1. Tragwerkszuverlässigkeit ..... 5
    - 2.1.1. Definition ..... 5
    - 2.1.2. Übersicht über die Verfahren ..... 7
    - 2.1.3. Grafische Darstellung der Tragwerkszuverlässigkeit ..... 8
  - 2.2. Basisvariablen..... 9
    - 2.2.1. Allgemein..... 9
    - 2.2.2. Wichtige Verteilungen ..... 10
    - 2.2.3. Korrelation ..... 12
  - 2.3. Schätzung der Verteilungsparameter aus Stichproben ..... 13
    - 2.3.1. Einführung ..... 13
    - 2.3.2. Momentenmethode ..... 13
    - 2.3.3. Methode der kleinsten Quadrate ..... 14
    - 2.3.4.  $\chi^2$ -Test ..... 15
    - 2.3.5. Kolmogoroff-Smirnow-Test ..... 16
    - 2.3.6. Bayes'sches Updating ..... 16
  - 2.4. Erforderliches Sicherheitsniveau ..... 17
  - 2.5. Ermittlung der Tragwerkszuverlässigkeit..... 19
    - 2.5.1. Basisvariablen und Grenzzustandsgleichungen ..... 19
    - 2.5.2. Parameter-Sensitivität..... 20
  - 2.6. Versagen nach einer Grenzzustandsgleichung ..... 21
    - 2.6.1. Allgemeine Fragestellung ..... 21
    - 2.6.2. Analytische Lösung ..... 22
    - 2.6.3. Momentenmethode ..... 24
    - 2.6.4. First Order Reliability Method ..... 25

2.6.5. Second Order Reliability Method .....	27
2.6.6. Monte-Carlo-Methode .....	28
2.6.7. Antwortflächenverfahren .....	29
2.7. Zuverlässigkeit von Systemen .....	30
2.7.1. Modellierung von Systemen .....	30
2.7.2. Seriensysteme .....	31
2.7.3. Parallelsysteme .....	32
2.7.4. Schranken.....	32
2.7.5. Hauptversagensformen .....	34
2.7.6. Globaler Bemessungspunkt .....	40
2.8. Stochastische Prozesse .....	44
2.9. Kombination zeitabhängiger Variablen.....	44
2.9.1. Turkstra-Regel .....	45
2.9.2. Borges-Castanheta-Modell .....	46
2.9.1. Wen-Kombinationsmethode .....	48
2.10. Möglichkeiten zur Berücksichtigung der Effekte höherer Ordnung .....	48
2.10.1. Allgemein.....	48
2.10.2. Anwendungen der Fließgelenktheorie .....	50
2.10.3. Anwendungen der Fließzonentheorie .....	51
2.10.4. Effekte höhere Ordnung und Sicherheitsbeiwerte – Vergleichsberechnungen	
54	
3. Normative Grundlagen .....	56
3.1. Bemessungskonzept mit Sicherheitsbeiwerten.....	56
3.1.1. Semi-probabilistische Verfahren .....	56
3.1.2. Elemente des semi-probabilistischen Verfahrens .....	58
3.1.3. Sicherheitselemente im Eurocode.....	61
3.1.4. Herleitung der Sicherheitselemente .....	63
3.2. Sicherheitsziele aus den Normen.....	64
3.2.1. Neubauten .....	64
3.2.2. Bestandsbauten .....	66
4. Modellierung der Basisvariablen.....	72
4.1. Modellierung der Beanspruchbarkeit von Stahlquerschnitten.....	72
4.1.1. Stahleigenschaften .....	72
4.1.2. Geometriestreuung .....	74

---

4.2. Modellunschärfen auf der Widerstandsseite.....	74
4.3. Ständige Lasten.....	77
4.3.1. Eigengewicht des Tragwerkes .....	78
4.3.2. Ausbaulasten.....	79
4.4. Windlasten.....	79
4.4.1. Beschreibung der Windlast.....	79
4.4.2. Probabilistische Modellierung der Windbelastung.....	81
4.4.3. Windprofile.....	83
4.4.4. Windgeschwindigkeitsdatenbank .....	85
4.4.5. Modellunschärfen beim Ansatz der Windlast.....	86
4.5. Schneelasten .....	87
4.5.1. Grundschnelast.....	87
4.5.2. Datenbank von Schneehöhen des DWD.....	91
4.5.3. Dachschnee .....	91
4.5.4. Modellunschärfen beim Ansatz der Schneelast .....	92
4.6. Modellierung von Modellunschärfen .....	93
5. Ableitung von langfristigen Datenreihen aus kurzfristigen Messreihen.....	94
5.1. Windbelastung nach Windrichtungen .....	94
5.1.1. Ziel.....	94
5.1.2. Konzept.....	94
5.1.3. Standorte .....	94
5.1.4. Vorgehensweise .....	95
5.1.5. Ergebnisse.....	96
5.1.6. Zusammenfassung .....	102
5.1.7. Anwendungsbeispiele .....	102
5.2. Korrelation der Windgeschwindigkeit zwischen nahe liegenden Standorten .....	105
5.2.1. Ziel.....	105
5.2.2. Konzept.....	105
5.2.3. Standorte .....	106
5.2.4. Vorgehensweise .....	106
5.2.5. Ergebnisse.....	108
5.2.6. Ausnahmen .....	116
5.2.7. Zusammenfassung .....	116
5.2.8. Anwendungsbeispiel .....	117

5.3. Korrelation der Schneemenge zwischen nahe liegenden Standorten .....	119
5.3.1. Ziel .....	119
5.3.2. Konzept .....	119
5.3.3. Standorte .....	120
5.3.4. Vorgehensweise .....	120
5.3.5. Ergebnisse .....	121
5.3.6. Zusammenfassung .....	123
6. Standortspezifische Momentanwertverteilungen .....	124
6.1. Allgemein .....	124
6.2. Empfehlungen aus der Literatur .....	125
6.3. Entwicklung der Momentanwertverteilungen .....	128
6.3.1. Kombination Schnee als Leiteinwirkung und Wind als Begleiteinwirkung	129
6.3.2. Kombination Wind als Leiteinwirkung und Schnee als Begleiteinwirkung	131
6.3.3. Wind als Leiteinwirkung und Schnee als Begleiteinwirkung nur an Tagen mit Schnee .....	133
6.4. Untersuchung der Annahmen der Turkstra-Regel .....	135
6.5. Untersuchung der Maßgeblichkeit der einzelnen Kombinationen .....	140
6.6. Auswertung der Ergebnisse .....	142
6.7. Momentanwertverteilung für unterschiedliche Bezugszeiträume .....	144
7. Ermittlung von modifizierten Sicherheitselementen .....	148
7.1. Modelle für die anzusetzenden Basisvariablen .....	148
7.2. Zielwert des Zuverlässigkeitsindex .....	150
7.3. Gewählte Verfahren für die Zuverlässigkeitsermittlungen .....	151
7.4. Grenzzustandsgleichungen .....	152
7.4.1. Elastisch-Elastisch und Elastisch-Plastisch .....	153
7.4.2. Plastisch-Plastisch .....	154
7.5. Ergebnisse der Wichtungsfaktoren .....	157
7.6. Entwicklung der Sicherheitsbeiwerte .....	165
7.6.1. Für Nachweisverfahren E-E/E-P .....	165
7.6.2. Für Nachweisverfahren P-P .....	168
7.6.3. Zusammenfassung .....	171
7.7. Entwicklung der Kombinationsbeiwerte .....	172
7.8. Kombinationsbeiwerte für die Leiteinwirkung .....	179
7.9. Standortspezifische Untersuchung des Lastfalls „außergewöhnliche Schneelast in der Norddeutschen Tiefebene“ .....	183

7.9.1. Hintergrund .....	183
7.9.2. Vorgehensweise und Ergebnisse.....	184
7.9.3. Schlussfolgerung.....	186
8. Fazit .....	187
8.1. Zusammenfassung .....	187
8.2. Ausblick.....	188
Literaturverzeichnis.....	189
Anhang A.....	196
Anhang B.....	209
Anhang C.....	222
Anhang D.....	233
Abbildungsverzeichnis.....	244
Tabellenverzeichnis.....	248
Abkürzungsverzeichnis.....	250
Symbolverzeichnis.....	251