



Berichte des Instituts für Massivbau

Michael Hansen

Monitoringgestützte Risikobewertung bestehender Massivbauwerke



Berichte

des Instituts für Massivbau der Leibniz Universität Hannover
Herausgeber:
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx
Leibniz Universität Hannover – Institut für Massivbau
Heft 10, Februar 2014

Fraunhofer IRB Verlag

<https://doi.org/10.51202/9783816792994-1>

Generiert durch IP '52.14.63.59', am 12.05.2024, 13:01:21.

Das Erstellen und Weitergeben von Kopien dieses PDFs ist nicht zulässig.

Herausgeber

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx
Leibniz Universität Hannover
Institut für Massivbau
Appelstraße 9A
30167 Hannover

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung in anderen als den gesetzlich zugelassenen Fällen bedarf deshalb der vorherigen schriftlichen Einwilligung des Herausgebers.

© 2014 by Univ.-Prof. Steffen Marx
Leibniz Universität Hannover
Institut für Massivbau
ISBN (Print): 978-3-8167-9298-7
ISBN (E-Book): 978-3-8167-9299-4

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB
Postfach 80 04 60, 70504 Stuttgart
Telefon 0711 970-2500
Telefax 0711 970-2508
E-Mail irb@irb.fraunhofer.de
URL <http://www.baufachinformation.de>

<https://doi.org/10.51202/9783816792994-1>

Generiert durch IP '52.14.63.59', am 12.05.2024, 13:01:21.

Das Erstellen und Weitergeben von Kopien dieses PDFs ist nicht zulässig.

Kurzfassung

Monitoringgestützte Risikobewertung bestehender Massivbauwerke

Der Zusammenhang zwischen der Sicherheit eines Bauwerks auf der einen und der Überprüfung seines Zustandes und Messung seiner Beanspruchung auf der anderen Seite ist nicht neu. In vielen Bereichen des Bauwesens finden dafür entsprechende Untersuchungen statt. Diese verfolgen einerseits das Ziel, die auf das Bauwerk wirkenden Einwirkungen genauer einschätzen zu können. Aus diesem Grund werden einige Einwirkungen unmittelbar mit Sensoren erfasst (z. B. Temperatur), andere hingegen nur indirekt z. B. über Bauteilreaktionen (z. B. Gewichts- und Verkehrslasten). Andererseits sollen mit einer Überprüfung frühzeitig Schäden oder Überbeanspruchungen festgestellt werden, um eine Schadensbehebung oder im Extremfall den Schutz von Personen und Sachmitteln zu ermöglichen.

Sobald die Öffentlichkeit durch ein katastrophales Bauwerkversagen schockiert wird, reagiert die Fachwelt z. T. mit innovativen, oftmals jedoch mit lange bekannten und in Vergessenheit geratenen Ansätzen. Die Gründe des Bauwerkversagens stehen dabei nicht immer im Fokus der Entwicklungen. Dies wurde wieder einmal z. B. nach dem tragischen Einsturz der Eissporthalle in Bad Reichenhall deutlich. In diesem Fall führten – wie im Regelfall – verschiedene Einflüsse und Randbedingungen zum Unglück und „neue“ Messverfahren können nur begrenzt dienlich sein.

Eine kostenverträgliche Erhaltung der Infrastruktur steht weltweit im Fokus der Untersuchungen. Nachdem bereits einige katastrophale Brückeneinstürze zu verzeichnen sind, werden auch die Politik und die Bevölkerung auf dieses Problem aufmerksam. Ein vorrangiges Ziel der bisherigen und aktuellen Forschungsarbeiten ist es, aus dem Gesamtbestand der Infrastrukturbauwerke eine klassifizierte Übersicht zu erstellen. Damit soll eine prioritätenorientierte, kostenoptimierte Instandhaltungsstrategie entwickelt werden. Für diese Aufgabe stehen bspw. bei Brückentragwerken Datenbanksysteme bereit, in denen die aus den Brückenprüfungen zusammengetragenen Erkenntnisse über den Zustand einer Brücke formuliert sind. Aufgrund der im Regelfall nur unzureichend vorliegenden Informationen sind die darauf basierenden Erhaltungsstrategien noch sehr anfällig.

Mit Prognosen über den Zustand wird versucht, den Erhaltungsaufwand abzuschätzen und zu planen. Die dafür erforderlichen Eingangswerte können mit statistischen Mitteln aus Messreihen und Simulationen abgeleitet werden. Ein weiterer Schritt besteht nun darin, diese statistischen Daten numerisch weiter zu bearbeiten und auf wahrscheinlichkeitstheoretischer Grundlage Prognosen zu formulieren. Für diese Arbeitsschritte bestehen sowohl national als auch international erste Ansätze. Ob damit genauere Vorhersagen möglich werden, hängt letztlich von der Verfügbarkeit und Qualität der relevanten Eingangswerte sowie den durch Modelle vorausgesetzten Abhängigkeiten ab.

In dieser Arbeit werden die vielfältigen Abhängigkeiten der zuvor genannten Größen benannt und Zusammenhänge dargestellt. Durch praxisnahe Anwendungen an Brücken, Windenergieanlagen und Hochbauten wird der Umgang mit der Messtechnik sowie den probabilistischen Ansätzen veranschaulicht.

Abstract

Monitoring-based risk assessment of existing concrete structures

The connection between the safety of a building on the one hand and the monitoring of its condition, as well as the measurement of its strain on the other, is well known. There are lots of respective and appropriate investigations done for that in many ranges of civil engineering. In some extent, these investigations are done for a more precise estimation of the effects influencing the building structure. Thus, some effects are directly recorded with sensors (e.g. temperature) or indirectly via component deflections (e.g. weight and traffic loads). Moreover, damage or overloads shall early be detected with check ups, to eliminate defects or even enable repair and of course protection of persons and equipment.

Whenever public is shocked by a catastrophic structural failure, experts often react on that with well-known but forgotten approaches. Often, the focus unfortunately is not set on the causes of the structural failure. This was noticeable once more after the tragic collapse of the indoor ice rink in Bad Reichenhall. Like common, in this case, different influences and constraints lead to the collapse and so-called "new" methods of measurements will only be partly helpful for prevention.

A cost compatible maintenance of infrastructure was globally brought into focus of the investigations. After a number of catastrophic bridge collapses have already been recorded, also the public and politics become aware of this problem. A prior aim of the previous and current research work is to create a classified overview out of the total stock of infrastructure buildings. Thereby, a priority-oriented, cost-effective maintenance strategy shall be developed. For this purpose there are database systems prepared in which the compiled condition knowledge e. g. of the bridge assessments are formulated. These parameters and findings are determined for bridges by regular bridge inspections. But, due to the insufficiently available information, it seems to be problematic to base sustainable maintenance strategies on them.

Condition projections aim at estimating and scheduling the maintenance effort. Therefore needed incoming parameters can be derived from former measurements and simulations with the help of statistical means. A further step then is to modify these statistics and to formulate further probabilistic forecasts. These works have both been done nationally and internationally and yet first approaches are available. Whether this leads to more accurate predictions eventually depends on the availability and quality of the relevant starting figures as well as the assumed model dependencies.

In this script, various dependencies and connections of above mentioned parameters are represented. By practical applications on bridges, wind turbines and buildings, the usage of monitoring and measuring as well as the probabilistic approaches are illustrated.

Résumé exécutive

Évaluation de risques d'ouvrages existants en béton basée sur le Monitoring

Le lien entre la sécurité d'une structure d'une part, tout comme le contrôle de son état et la mesure de son chargement d'autre part n'est pas nouveau. De nombreuses études sont menées dans les divers domaines du génie civil, dans l'optique d'estimer les cas de charge agissant sur la structure du bâtiment. Certaines de ces charges sont directement mesurées avec des capteurs, comme la température par exemple. D'autres en revanche sont mesurées indirectement par la réaction des composantes de l'édifice telles que les contraintes dues au poids propre et aux charges de trafic. Par ailleurs, cette vérification doit permettre d'identifier à temps d'éventuels dégâts ou une surcharge, afin de pouvoir les réparer ou dans un cas extrême d'assurer la protection des personnes et des biens.

Dès lors que la défaillance d'un bâtiment est publiée dans les médias, celle-ci provoque l'émoi. L'ensemble des spécialistes réagit alors en innovant mais aussi souvent par des approches connues de longue date, partiellement tombées dans l'oubli. Les raisons de la défaillance d'un bâtiment ne représentent pourtant pas toujours une priorité pour la recherche. Ceci fut significatif après l'effondrement tragique du toit d'une patinoire à Bad Reichenhall. Dans ce cas, tout comme dans le cas général, plusieurs influences et paramètres ont conduit à la catastrophe. De nouvelles méthodes de mesure n'ont cependant dans un tel cas qu'un effet restreint.

Le maintien des infrastructures à coût raisonnable est actuellement au centre de beaucoup de recherches. Avec l'effondrement de plusieurs ponts, aux conséquences dramatiques, les hommes politiques ainsi que la population ont pris conscience de ce problème. Les travaux de recherche actuels ont pour objectif essentiel de dresser une classification de l'infrastructure, dans le but de développer une stratégie d'optimisation en matière de priorités et de coûts. Dans cette optique, pour les ouvrages d'art, des bases de données complétées avec les résultats de contrôle d'ouvrage sont à disposition. À cause des informations trop souvent insuffisantes, les stratégies de conservation se basant sur ces dernières ne sont pas très fiables.

Le but des pronostics sur l'état d'un ouvrage est d'en estimer et d'en planifier l'investissement pour sa conservation. Les données nécessaires pour l'établissement de ce pronostic peuvent être obtenues par le dépouillement des mesures, leur étude statistique et par simulation. L'étape suivante réside dans l'exploitation numérique des données statistiques pour en extraire des pronostics se basant sur la théorie probabilistique. Des approches nationales et internationales existent pour progresser dans ce travail. Mais la précision de ces estimations dépend à la fois de la disponibilité et de la qualité des données enregistrées ainsi que des corrélations présupposées dans les modèles utilisés.

Dans ce travail, les contraintes entre les variables mentionnées ci-dessus seront nommées ainsi que les corrélations qui existent entre elles. Grâce à des applications pratiques aux ouvrages d'art, aux structures éoliennes et aux bâtiments, le rapport avec les techniques de mesures ainsi que l'approche probabilistique sont concrétisés.

Stichworte

Bestand ♦ Betonbauwerke ♦ Brücken ♦ Lebensdauer ♦ Lebenszyklus ♦ Massivbau ♦ Messverfahren ♦ Monitoring ♦ Probabilistik ♦ Probelastung ♦ Risiko ♦ Sicherheit ♦ Überwachung ♦ Windenergieanlagen ♦ Zuverlässigkeit

Keywords

Bridges ♦ Concrete Structures ♦ Existing Buildings ♦ Life Cycle ♦ Measurement Methods ♦ Monitoring ♦ Probabilistic ♦ Proof Load Test ♦ Reliability ♦ Risk assessment ♦ Safety ♦ Service Life ♦ Wind Energy Turbines

mot-clé

construction en béton ♦ contrôle ♦ cycle de vie ♦ durée de vie ♦ éoliennes ♦ essai de charge ♦ fiabilité ♦ méthode de mesure ♦ monitoring ♦ ouvrage existant ♦ ouvrage en béton ♦ ouvrage d'art ♦ probabilistique ♦ risque ♦ sécurité

Vorwort

Diese Arbeit ist im Rahmen meiner Tätigkeit am Institut für Massivbau der Leibniz Universität Hannover entstanden. Die dortigen Arbeitsfelder inspirierten mich, die Hintergründe vorhandener messtechnischer Überwachungen sowie der bemessungsrelevanten Sicherheitsaspekte zu hinterfragen. Seit einigen Jahren werden auch im Bauwesen verstärkt probabilistische Methoden eingesetzt. Meine thematisch in diesem Bereich angesiedelte Dissertation aus dem Jahr 2004 bot mir ein wertvolles Grundlagenwissen und ermöglichte damit die Zusammenführung verschiedener Themenfelder. Die verschiedenen praxisnahen Forschungsprojekte, die ich seither im Hochbau, im Brückenbau sowie für Windenergieanlagen bearbeiten konnte, zeigten viele Gemeinsamkeiten und die Notwendigkeit auf, die vielfältigen Aspekte der Messungen und Auswertungen an diesen Bauwerken im Zusammenhang mit sicherheits- bzw. zuverlässigkeitstheoretischen Hintergründen zu analysieren und zu dokumentieren. Diese Herausforderungen und Möglichkeiten möchte ich darstellen und hoffe, dass die vorliegende Habilitationsschrift eine breite Leserschaft findet und der geneigte Leser Nutzen aus dieser Arbeit zieht.

Im September 2012 habe ich meine Habilitationsschrift mit dem Titel „Monitoringgestützte Risikobewertung bestehender Massivbauwerke“ an der Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie der Leibniz Universität Hannover eingereicht. Herr Prof. Ludger Lohaus als Dekan hat das Verfahren in der Sitzung des Fakultätsrats am 10.10.2012 eröffnet. Am 16.1.2013 wurden in der Sitzung der Habilitationskommission die Gutachter benannt.

| | | |
|------------------------|-----------------------|---|
| Kommissionsmitglieder: | Prof. Lohaus | (Baustoffe, Vorsitz) |
| | Prof. Grünberg | (Massivbau) |
| | Prof. Marx | (Massivbau) |
| | Prof. Schaumann | (Stahlbau) |
| | Prof. Schlurmann | (Küsteningenieurwesen) |
| | Prof. Neumann | (Geodäsie) |
| | Prof. Fouad | (Bauphysik) |
| | Dr. Steinborn | (Baustoffe) |
| | Hr. Weisser | (Studentischer Vertreter) |
| Gutachter: | Prof. Jürgen Grünberg | (Massivbau, LUH) |
| | Prof. Steffen Marx | (Massivbau, LUH) |
| | Prof. Manfred Curbach | (Massivbau, TU Dresden) |
| | Prof. Michael Beer | (Engineering Sustainability, University of Liverpool) |

Die 90-minütige studiengangsbezogene Lehrveranstaltung mit dem Titel

„Rissbreitennachweis im Stahlbetonbau“

fand am 5.7.2013 vor ca. 90 Anwesenden statt. Nach dem wissenschaftlichen Vortrag am 6.9.2013 vor ca. 70 Teilnehmern mit dem Titel

„Lebenszyklusbewertung von Massivbauwerken“

wurde mir die Venia Legendi für das Fach „Massivbau“ verliehen und mit der Antrittsvorlesung Mitte 2014 die zugehörige Urkunde.

In meiner Habilitationsschrift habe ich die Inhalte zahlreicher eigener Forschungsarbeiten und Veröffentlichungen der letzten Jahre aufgegriffen, die maßgeblich in den zitierten Veröffentlichungen [H.1] bis [H.38] sowie den Berichten [I.1] bis [I.20] dokumentiert sind. Mit der Bearbeitung habe ich 2007 begonnen und viele interessante Diskussionen haben seither zur thematischen Abrundung beigetragen. Einigen Wegbegleitern möchte ich an dieser Stelle herzlich danken:

Meinem langjährigen Institutsleiter und Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Grünberg danke ich herzlich für die Möglichkeit zur Habilitation, der stets überaus kompetenten fachlichen Unterstützung und seinem väterlichen Rat. Herrn Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx als nachfolgendem Institutsleiter danke ich vor allem für die Freiheiten, durch die mir die Fertigstellung dieser Arbeit erst möglich wurde und für das überaus kollegiale Verhältnis am Institut. Herrn Prof. Dr. Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach und Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Beer gilt mein besonderer Dank für die Übernahme des Coreferats. Herrn Prof. Dr.-Ing. Ludger Lohaus als Vorsitzenden der Habilitationskommission, allen Kommissionsmitgliedern sowie der Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie möchte ich herzlich für die Möglichkeit zur Habilitation sowie die damit verbundenen Aufwendungen danken.

Über allem steht natürlich der besondere Dank für meine Familie. Ohne die mentale Unterstützung meiner wunderbaren Frau Gitta und unserer beiden Kinder Finn Alexander und Jorina Sophie, die uns stets mit sehr großem Stolz erfüllen, hätte ich diese Arbeit wohl niemals anfertigen können. Diesen wichtigsten Menschen in meinem Leben möchte ich diese Arbeit widmen.

Inhalt

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Einleitung und Überblick..... | 1 |
| 1.1 | Einführung | 1 |
| 1.2 | Problemstellung und Motivation..... | 2 |
| 1.3 | Stand der Forschung | 5 |
| 1.4 | Zielsetzung und Nutzen | 6 |
| 1.5 | Überblick über die nachfolgenden Kapitel | 6 |
| 2 | Risiko, Zuverlässigkeit und Sicherheit | 9 |
| 2.1 | Risiko..... | 9 |
| 2.1.1 | Risikoklassifikation | 11 |
| 2.1.2 | Risikowahrnehmung und -akzeptanz | 11 |
| 2.1.3 | Versagensfolgenbewertung..... | 16 |
| 2.1.4 | Bezugszeitraum, Nutzungszeitraum und Lebensdauer | 19 |
| 2.1.5 | Zuverlässigkeitsklassen und Zielzuverlässigkeit..... | 22 |
| 2.2 | Fehler, Schäden und Unsicherheiten..... | 30 |
| 2.2.1 | Fehlerquellen in den Planungsphasen | 30 |
| 2.2.1.1 | <i>Entwurf/Planung.....</i> | <i>30</i> |
| 2.2.1.2 | <i>Berechnung.....</i> | <i>30</i> |
| 2.2.1.3 | <i>Herstellung.....</i> | <i>33</i> |
| 2.2.1.4 | <i>Nutzung.....</i> | <i>33</i> |
| 2.2.2 | Fehlermechanismen..... | 33 |
| 2.2.3 | Fehler und Schäden an Bauwerken | 34 |
| 2.2.4 | Schadensarten, -ursachen und -bewertung..... | 36 |
| 2.2.5 | Unsicherheiten – Arten und Herkunft/Ursache | 39 |
| 2.2.6 | Faktor Mensch – Human Errors/Gross Errors | 41 |
| 2.3 | Bewertungs- und Zuverlässigkeitsverfahren im Überblick | 45 |
| 2.3.1 | Bewertungsverfahren | 45 |
| 2.3.2 | Methoden zur Sicherstellung einer ausreichenden Zuverlässigkeit | 47 |
| 2.3.2.1 | <i>Allgemeine Beschreibung</i> | <i>47</i> |
| 2.3.2.2 | <i>Dauerhaftigkeitsbetrachtungen.....</i> | <i>48</i> |
| 2.3.2.3 | <i>Tragwerksbewertungen</i> | <i>48</i> |
| 2.3.3 | Zuverlässigkeitsverfahren | 49 |
| 2.4 | Stochastische Eingangswerte und Modellunsicherheiten | 51 |
| 2.4.1 | Stochastische Eingangswerte | 51 |
| 2.4.2 | Einwirkungen und Einwirkungsmodelle | 52 |
| 2.4.3 | Widerstände und Widerstandsmodelle..... | 53 |
| 2.5 | Sicherheitselemente und Grenzzustände | 59 |
| 2.5.1 | Sicherheitselemente der Bemessung..... | 60 |
| 2.5.1.1 | <i>Teilsicherheitsbeiwerte</i> | <i>60</i> |
| 2.5.1.2 | <i>Kombinationswerte</i> | <i>65</i> |
| 2.5.2 | Grenzzustände..... | 67 |
| 2.5.2.1 | <i>Grenzzustände der Dauerhaftigkeit (DLS).....</i> | <i>68</i> |

| | | |
|---------|--|-----|
| 2.5.2.2 | Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit (SLS) | 75 |
| 2.5.2.3 | Grenzzustände der Tragfähigkeit (ULS) | 76 |
| 2.5.2.4 | Grenzzustände der Ermüdung (FLS) | 79 |
| 2.5.3 | Teilsicherheitsbeiwerte für Neu- und Bestandsbauten | 85 |
| 2.6 | Systemzuverlässigkeit | 88 |
| 2.6.1 | Serien- und Parallelsysteme | 89 |
| 2.6.2 | Fehler-, Ereignis- und Entscheidungsbäume | 91 |
| 2.7 | Datenermittlung und -updating | 93 |
| 2.7.1 | Datenermittlung | 93 |
| 2.7.1.1 | Bestandsaufnahme | 94 |
| 2.7.1.2 | Inspektionen und Materialprüfung | 94 |
| 2.7.1.3 | Monitoring | 95 |
| 2.7.1.4 | Belastungsversuch | 95 |
| 2.7.2 | Berücksichtigung zusätzlicher Informationen (Updating) | 96 |
| 2.7.2.1 | Inspektionen | 98 |
| 2.7.2.2 | Belastungsversuch | 99 |
| 2.7.2.3 | Beanspruchungshistorie | 101 |
| 2.7.2.4 | Gebrauchstauglichkeit / Dauerhaftigkeit | 101 |
| 2.8 | Angewandte Zuverlässigkeitsanalyse | 102 |
| 2.8.1 | Stufen der Zuverlässigkeitsanalyse | 102 |
| 2.8.2 | Theorie und Praxis | 103 |
| 2.8.3 | Grundsätze für die Sicherheit von Bauwerken | 106 |
| 2.8.4 | Bestandsbauten | 107 |
| 2.8.5 | Lebensdauerprognosen | 109 |
| 2.8.6 | Instandhaltung und Bauwerksmanagement | 111 |
| 2.8.6.1 | Erhaltungsplanung | 111 |
| 2.8.6.2 | Bauwerksmanagementsysteme | 112 |
| 2.8.6.3 | Lebenszyklusmanagement (Life-Cycle-Engineering) | 113 |
| 2.8.6.4 | Praxisnahe Managementsysteme | 115 |

3 Inspektionen und Messungen 117

| | | |
|---------|--|-----|
| 3.1 | Warum werden Sensoren eingesetzt? | 117 |
| 3.2 | Messeinrichtungen | 118 |
| 3.2.1 | Grundbegriffe | 118 |
| 3.2.2 | Verfahren und Sensoren für Messungen im Bauwesen | 119 |
| 3.2.2.1 | Mechanische Sensoren | 120 |
| 3.2.2.2 | Elektrische Sensoren | 121 |
| 3.2.2.3 | Optische Verfahren | 125 |
| 3.2.2.4 | Geodätische Verfahren | 126 |
| 3.2.2.5 | Temperaturmessungen | 126 |
| 3.2.2.6 | Messungen realer Verkehrslasten | 126 |
| 3.2.2.7 | Weitere Verfahren | 129 |
| 3.2.2.8 | Zusammenfassung | 130 |
| 3.2.3 | Messwertverstärker für Messungen im Bauwesen | 131 |
| 3.2.4 | Datenermittlung, Auswertung und Interpretation | 134 |
| 3.2.4.1 | Datentransport und -speicherung | 134 |
| 3.2.4.2 | Datenauswertung | 134 |
| 3.3 | Experimentelle Methoden | 136 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 3.3.1 | Laboruntersuchungen | 136 |
| 3.3.2 | In-situ-Messungen..... | 136 |
| 3.3.3 | Zerstörungsfreie und zerstörende Prüfmetho- den | 137 |
| 3.3.4 | Monitoring | 141 |
| 3.3.5 | Experimentelle Tragsicherheitsbewertung..... | 143 |
| 3.4 | Messkonzept..... | 149 |
| 3.4.1 | Grundlagen | 149 |
| 3.4.2 | Unterteilung des Bauwerks | 150 |
| 3.4.3 | Datenerfassung, -sammlung und -dokumentation | 151 |
| 3.4.4 | Datenanalyse | 152 |
| 3.4.5 | Stichprobenumfang für relevante Bewertungen..... | 153 |
| 3.4.6 | Maßstabeffekte | 158 |
| 3.5 | Messunsicherheiten und Unsicherheiten in der Messtechnik | 161 |
| 3.5.1 | Messunsicherheiten | 162 |
| 3.5.2 | Unsicherheiten in der Messtechnik..... | 166 |
| 3.6 | Angaben zur Belastungsgeschichte aus Monitoring | 167 |
| 3.7 | Praxisanwendungen | 167 |
| 4 | Zum Risiko baulicher Anlagen..... | 169 |
| 4.1 | Lessons learned | 170 |
| 4.2 | Kosten..... | 171 |
| 4.3 | Hochbauten | 176 |
| 4.4 | Straßenbrücken | 179 |
| 4.4.1 | Forschungsaktivitäten (Verkehrslasterfassungen)..... | 182 |
| 4.4.2 | Monitoring und Probelastungen bei Brücken..... | 184 |
| 4.4.2.1 | <i>Objektbezogenes Monitoring an Kastenträgerbrücken</i> | <i>185</i> |
| 4.4.2.2 | <i>Belastungsversuche an Brücken</i> | <i>192</i> |
| 4.4.3 | Probabilistische Berechnung einer Straßenbrücke | 193 |
| 4.5 | Windenergieanlagen (Onshore/Offshore) | 200 |
| 4.5.1 | Aktueller Stand..... | 201 |
| 4.5.2 | Forschungsaktivitäten | 204 |
| 4.5.3 | Monitoring | 206 |
| 4.5.4 | Probabilistische Berechnung einer WEA..... | 209 |
| 5 | Zusammenfassung und Ausblick..... | 213 |
| 5.1 | Zusammenfassung | 213 |
| 5.2 | Ausblick | 215 |
| 6 | Literatur..... | 217 |
| 6.1 | Normen und Richtlinien / Regelwerke..... | 217 |
| 6.2 | Literatur zu Kapitel 1 | 221 |
| 6.3 | Literatur zu Kapitel 2: Zuverlässigkeit | 222 |
| 6.4 | Literatur zu Kapitel 3: Monitoring | 243 |
| 6.5 | Literatur zu Kapitel 4: Risiko baulicher Anlagen..... | 256 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 6.6 | Literatur mit Beiträgen des Autors (Auszug) | 262 |
| 6.6.1 | Bücher und Aufsätze | 262 |
| 6.6.2 | Tagungsbeiträge und Vorträge | 263 |
| 6.6.3 | Institutsberichte | 265 |
| 6.7 | Literatur zur Versuchstechnik..... | 266 |
| 6.8 | Literatur zu Anwendungen | 268 |
| 6.8.1 | Allgemein..... | 268 |
| 6.8.2 | Nachrechnungsrichtlinie | 268 |
| 6.8.3 | Spannungsrissskorrosion | 269 |
| 7 | Glossar, Abkürzungen und Verweise | 271 |
| 7.1 | Glossar..... | 271 |
| 7.2 | Abkürzungen..... | 281 |
| 7.3 | Forschungsverbunde und Kongresse | 283 |
| 8 | Anhang..... | 285 |
| 8.1 | Statistik | 285 |
| 8.1.1 | Gebräuchliche statistische Verteilungen | 285 |
| 8.1.2 | Student-Verteilung..... | 286 |
| 8.2 | Phasen eines Bauwerks nach VDI nach [H.18]..... | 287 |
| 8.3 | Betondruckfestigkeiten..... | 290 |
| 8.4 | Zeitpunkte im DLS | 292 |
| 8.4.1 | Karbonatisierung | 292 |
| 8.4.2 | Chloridmigration | 292 |
| 8.4.3 | Rissbildung und Betonabplatzung..... | 293 |
| 8.4.4 | Querschnittsreduzierung durch Korrosion..... | 293 |
| 8.5 | Schadensdatenbank | 294 |
| 8.6 | Probabilistische Berechnungen..... | 296 |
| 8.6.1 | Brücken | 296 |
| 8.6.2 | Windenergieanlagen..... | 298 |

