



*Jochen Köhler
Dr. sc. techn.
ETH
Zürich, Schweiz*

Zuverlässigkeit von Gebäuden und systematische Schadens- erfassung

Zuverlässigkeit von Gebäuden und systematische Schadenserfassung

Zusammenfassung

Die Methoden zur Beurteilung der Bauwerkszuverlässigkeit wurden in den letzten Jahrzehnten weiterentwickelt, verbessert und angepasst, so dass sie heute im praktischen Ingenieurwesen ihre Anwendung finden; zum Beispiel als Entscheidungshilfe bei dem Entwurf und dem Unterhalt von Bauwerken oder als Werkzeug zur Weiterentwicklung und Anpassung von Normenwerken. Für Bauwerke aus Stahl und Beton führte die Anwendung dieser Methoden zu einer konsistenteren Beurteilung der Sicherheit und der Zuverlässigkeit. Obschon für Bauwerke aus Holz einige Anstrengungen unternommen wurden, diese Methoden zur Anwendung zu bringen, sind die erreichten Entwicklungen im Vergleich zu anderen Baumaterialien weniger fortgeschritten. Einer der Hauptgründe für diesen Unterschied ist die hohe Komplexität des Baumaterials Holz; um das volle Potential des Baumaterials Holz auszuschöpfen ist ein hohes Maß an Fachkenntnis erforderlich.

Im folgenden Referat wird kurz auf die Begriffe Versagenswahrscheinlichkeit und Zuverlässigkeit eingegangen. Es wird erörtert welche Eigenschaften von Holz maßgebend für die Zuverlässigkeit sind.

Ein weiterer wichtiger Punkt bei der Entwicklung einer besseren Wissensbasis bezüglich des Tragverhaltens von Holz ist die Untersuchung und die Beurteilung von Bauwerken bei denen es zu Schäden oder gar zum Bauwerkseinsturz gekommen ist. In diesem Zusammenhang werden die Grundlagen für eine systematische Schadenserfassung diskutiert.

Hintergrund

Holz ist ein sehr leistungsfähiges Konstruktionsmaterial. Holz hat ein mit Stahl vergleichbares Verhältnis von Festigkeit zu Gewicht und ist sehr leicht. Bauen mit Holz ist nachhaltig, denn die Produktion und Verarbeitung benötigen wenig Energie. Zudem verfügen Häuser aus Holz meist über exzellente Wärmedämmeigenschaften.

Trotzdem wird Holz im Bauwesen vergleichsweise selten eingesetzt. Attribute wie Zuverlässigkeit, Gebrauchstauglichkeit oder Dauerhaftigkeit werden im Allgemeinen nicht mit dem Baumaterial Holz in Verbindung gebracht. Sowohl die hohe Komplexität als auch die Unkenntnis über einige grundlegende Eigenschaften von Holz als Baumaterial gelten als Hauptgründe. Das Planen und Bemessen von Holzkonstruktionen verlangt daher ein hohes Maß an Sorgfalt.

Die vermehrte Verwendung von Holz sollte ein allgemeines Anliegen sein und Initiativen wie holz21, ein Förderprogramm des Schweizer Bundesamt für Umwelt, setzen sich dies klar zum Ziel.

Die Grundvoraussetzung für eine vermehrte Verwendung von Holz in Baukonstruktionen ist, dass die Eigenschaften des Baumaterials Holz über den gesamten Lebenszyklus eingeschätzt werden können. Der Lebenszyklus von Bauwerken ist in Abbildung 1 schematisch aufgezeigt.

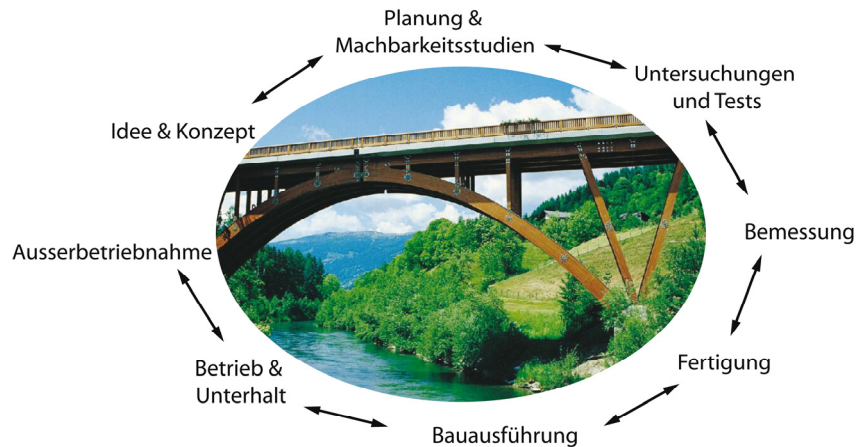


Abbildung 1: Schema eines Bauwerkslebenszyklus.

Bauwerke müssen Anforderungen bezüglich der Sicherheit von Personen, Sicherheit der Umwelt und der Wirtschaftlichkeit erfüllen. Davon abgeleitet sind Eigenschaften wie Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit, Dauerhaftigkeit, Kosteneffizienz, Erscheinungsbild, etc. Entscheidungen, welche während des Lebenszyklus zu treffen sind, zielen also darauf ab, diese Eigenschaften zu erreichen. Eine wichtige Entscheidung ist auch die des zu verwendenden Baumaterials. Hauptkriterium für diese Entscheidung ist die Beurteilung der generellen Eignung des Baumaterials in dem geplanten Bauwerk. Eignen sich prinzipiell mehrere Baumaterialien für die gleiche Anwendung im Bauwerk ist das Vertrauen der Entscheidungsträger (z.B. der Bauherren oder der Ingenieure), dass das gewählte Baumaterial den oben genannten Anforderungen entspricht maßgebend.

Das Vertrauen in Baumaterialien wie Holz hängt wiederum von dem Wissen ab, welches über das Baumaterial zur Verfügung steht. Um den Holzbau zu fördern, d.h. um es zu ermöglichen, mehr leistungsfähige und qualitativ hochwertige Tragwerke aus Holz zu erstellen, ist es notwendig, dass die in Abbildung 2 dargestellten Faktoren gleichmäßig und koordiniert weiterentwickelt werden.

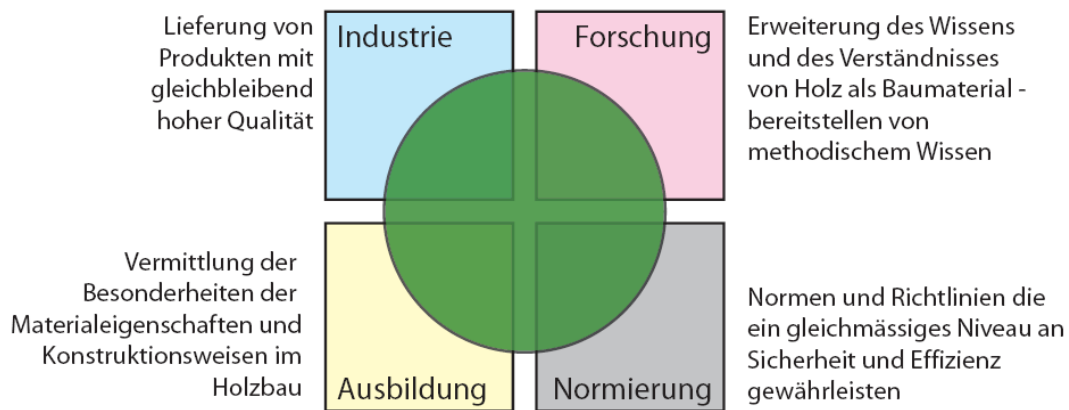


Abbildung 2: Faktoren zur Förderung des Holzbaus.

Ein effizientes System von Normen und Richtlinien bildet sicherlich einen der Grundpfeiler für erfolgreiche Anwendungen im Holzbau. Ebenfalls von großer Bedeutung ist der Faktor Aus- und Weiterbildung, ist doch für die Konzeption und Bemessung von Holzbauwerken ein hohes Maß an Expertise notwendig (Stichworte: konstruktiver Holzschutz, Verbindungen). Die Lieferung von Bauholz und Holzmaterialien mit gleichbleibend hoher Qualität ist entscheidend - Aspekte der Qualitätskontrolle und deren Weiterentwicklung sind für die Holzindustrie von

großer Wichtigkeit. Dem Bereich der Holzforschung kommt bei dieser Aufzählung eine besondere Bedeutung zu. Forschung dient generell der Erweiterung von Wissen. Im gegenwärtigen Kontext ist klar ersichtlich, dass zielgerichtete Forschung die Grundvoraussetzung für Weiterentwicklungen in den drei zuvor erwähnten Bereichen ist. Um Forschung im Bereich Ingenieurholzbau zielgerichtet zu planen und durchzuführen, ist es nötig die gewünschten Eigenschaften von Holzbauwerken modellieren zu können. Neben anderen Aspekten ist ein wichtiger Punkt hierbei die Modellierung der Tragfähigkeit, der Gebrauchstauglichkeit und der Dauerhaftigkeit, um sicher zu stellen, dass diese Eigenschaften zuverlässig eingehalten werden können.

Zuverlässigkeit von Holzbauwerken

Bei der Modellierung der Zuverlässigkeit von Bauwerken wird generell die Interaktion zwischen Einwirkungen auf das Holzbauwerk und dem Widerstand des Holzbauwerkes gegenüber diesen Einwirkungen betrachtet. Einwirkungen können mechanische Lasten sein, aber auch Feuchte, Feuchtewechsel und die dadurch hervorgerufenen inneren Spannungen sind als Einwirkung auf Holzbauwerke zu beachten. Widerstände sind demnach Festigkeiten und Steifigkeiten sowie die Materialdauerhaftigkeit gegenüber Umwelteinflüssen.

Ein einfaches Beispiel für die Interaktion zwischen Einwirkungen und dem Widerstand ist die Betrachtung der Tragfähigkeit eines Biegebalkens, welcher einer Personenlast ausgesetzt ist. Wären alle Einflussgrößen, d.h. Gewicht der Person, Biegefestigkeit des Balkens und Geometrie des Balkens sowie der Ort der Lasteinwirkung bekannt, ließe sich mit Sicherheit vorhersagen, ob die Tragfähigkeit des Balkens gewährleistet ist. Bei der Bemessung des Balkens ließe sich also eindeutig ein Querschnitt des Balkens auswählen, welcher die Zuverlässigkeit des Balkens garantiert. Während die Geometrie und der Ort der Lasteinwirkung in der Regel zu bestimmen sind, sind die Einflussgrößen Biegefestigkeit und Last nicht genau bekannt – es sind sog. unsichere Einflussgrößen. Sind Biegefestigkeit und Last unsicher, sind auch die hiervon abgeleiteten Größen Einwirkung und Widerstand unsicher. In Abbildung 3 ist der betrachtete Balken schematisch dargestellt. G ist das Gewicht der Person in Balkenmitte, l ist die Spannweite, W der Widerstandsmoment, f_m die Biegefestigkeit. R und S bezeichnen Widerstand und Einwirkung. Der Balken versagt, wenn der Widerstand kleiner ist als die Einwirkung; die Ungleichung ist rechts neben der Abbildung dargestellt.

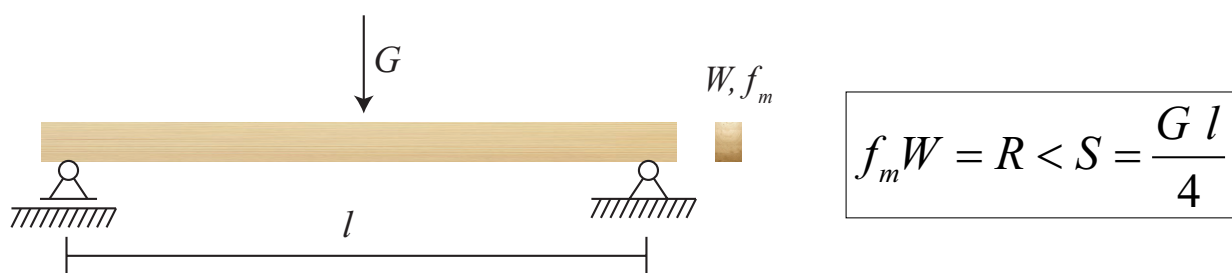


Abbildung 3: Darstellung des Biegeträgers. Ungleichungsbedingung für den Zustand Versagen.

Die Zustände ‚Tragfähig‘ und ‚Versagen‘ können nicht eindeutig vorhergesagt werden – was vorhergesagt werden kann ist die Wahrscheinlichkeit P_f , dass ein Balken versagt, bzw. die Wahrscheinlichkeit $1 - P_f$, dass der Balken nicht versagt.

Der Widerstand R und die Einwirkung S werden mittels Zufallsvariablen repräsentiert. Kann angenommen werden, dass Einwirkung und Widerstand voneinander unabhängige normalverteilte Zufallsvariablen sind, kann die Versagenswahrscheinlichkeit einfach und illustrativ ermittelt werden. In Abbildung 4 sind die Größen mit ihrer Wahrscheinlichkeitsdichte dargestellt.

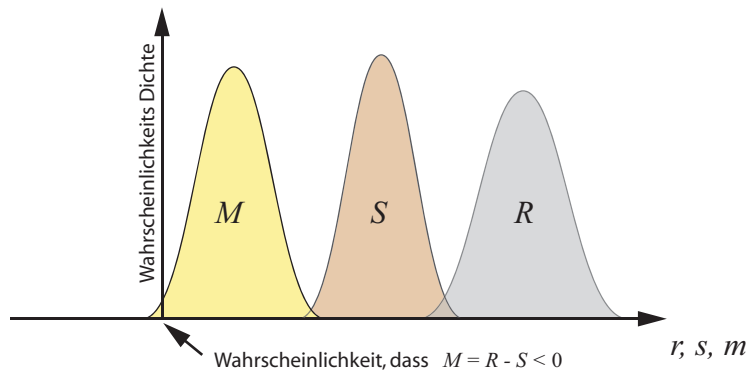


Abbildung 4: Darstellung von Widerstand R und die Einwirkung S zusammen mit der sog. Sicherheitsmarge M .

Ebenfalls in Abbildung 4 dargestellt ist die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der sogenannten Sicherheitsmarge, welche sich aus der Differenz von Widerstand und Einwirkung ergibt; $M = R - S$. Wenn die Sicherheitsmarge einen Wert kleiner null annimmt; $M < 0$, ist dies gleichbedeutend mit dem Ereignis ‚Widerstand kleiner Einwirkung‘; $R < S$, d.h. dem Versagen des Balkens. Die Versagenswahrscheinlichkeit $P_f = P(M < 0)$ ist äquivalent mit der Fläche der Dichtefunktion der Sicherheitsmarge links vom Ursprung.

Ein wichtiger Faktor bei Betrachtungen der Versagenswahrscheinlichkeit ist es, eine möglichst gute Modellabbildung der Holz Materialeigenschaften zu erreichen. In der Regel reichen die in Abbildung 3 und Abbildung 4 getätigten vereinfachten Annahmen nicht aus, um das Tragverhalten von Holzkonstruktionen abzubilden. Auf der einen Seite sind die Bemessungssituationen vielfältig und komplex, andererseits hängen Holz materialeigenschaften von einer Vielzahl von Einflussgrößen ab.

Holz als Baumaterial

Holz ist ein komplexes Material. Seine Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften hängen von mehreren Faktoren ab. Die Biegefestigkeit eines Balkens z.B. hängt ab von der Holzart, der Herkunft, der Größe, der Lasteinwirkungsdauer, den Klimabedingungen, etc. Um Holz an einem beliebigen Ort im Bauwerk zu modellieren wird folgendes Modellierungsschema angewandt.

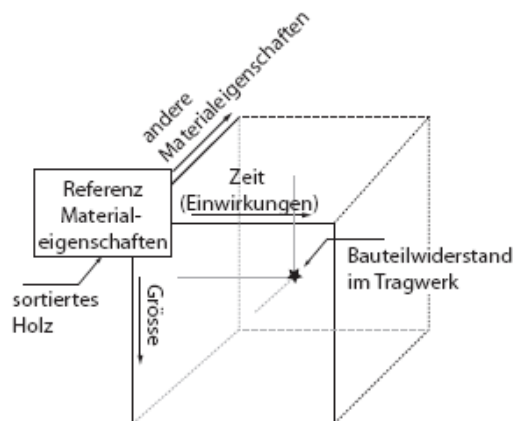


Abbildung 5: Modellierungsschema Holz als Baumaterial [1].

Hierbei bilden die Referenzmaterialeigenschaften den Einstieg in die Modellierung. Die Referenzmaterialeigenschaften sind die Eigenschaften, aus denen Holzsortierkriterien hergeleitet werden. Bauholz wird in Festigkeitsklassen eingeteilt, welche bestimmte Kriterien bezüglich Biegefestigkeit, Biegesteifigkeit und Rohdichte zu erfüllen haben. Diese Eigenschaften werden unter festgelegten Laborbedingungen (bezüglich Größe, Geometrie, Lasteinwirkungsort und -dauer, Klimabedingungen) ermittelt. Sehr viele Informationen über diese Materialeigenschaften sind vorhanden und die probabilistische Modellierung dieser Eigenschaften kann auf einer großen Anzahl von Messdaten basieren.

Eigenschaft	Verteilungstyp	Variationskoeffizient
Biegefestigkeit	Lognormal	0.25
Biegesteifigkeit	Lognormal	0.13
Rohdichte	Normal	0.1

Tabelle 1: Referenzmaterialeigenschaften von Holz, Verteilungstypen und Variationskoeffizienten.

Aus den Angaben in Tabelle 1 lässt sich nun z.B. ein einfaches probabilistisches Modell der Biegefestigkeit von Holz der Festigkeitsklasse C24 erstellen. Die Festigkeitsklasse C24 muss unter anderem Kriterien bezüglich der Biegefestigkeit erfüllen – der 5% Fraktilwert (also der Wert der mit einer Wahrscheinlichkeit von 0.05 unterschritten wird) der Biegefestigkeit soll mindestens 24 MPa betragen. Wird angenommen, der 5% Fraktilwert beträgt exakt 24 MPa, lässt sich folgendes probabilistisches Modell für die Biegefestigkeit X erstellen:

$$x_{0.05} = 24 \text{ MPa} \Rightarrow \mu_X = 37 \text{ MPa}; \quad \sigma_X = 9.26 \text{ MPa}$$

Basierend auf diesem probabilistischen Modell können nun beliebige Materialeigenschaften an einem beliebigen Ort im Bauwerk modelliert werden. Im sog. Probabilistic Model Code des Joint Committee on Structural Safety (JCSS) [2], [3] sind Modelle zur Einschätzung der Tragwerkszuverlässigkeit angegeben. Im neu erstellten Kapitel über die Modellierung von Holz sind Modelle vorgeschlagen, welche die komplexen Eigenschaften von Holz berücksichtigen und vor allem die Unsicherheiten, die mit den Modellannahmen verbunden sind, konsistent berücksichtigen.

Die Modelle z.B. zur Berücksichtigung des Größeneinflusses oder des Einflusses der Lasteinwirkungsdauer auf die Holzmaterialeigenschaften repräsentieren den heutigen Stand des Wissens und sind noch mit sehr großen Modellunsicherheiten behaftet. Zukünftige Forschung sollte darauf abzielen, diese Modellunsicherheiten zu verringern. Im Folgenden wird eine Zusammenstellung der aus der Sicht des Autors wichtigsten Aspekte gegeben:

- Die Modellierung von Systemeffekten im Holzbau, inklusive Betrachtungen bezüglich Robustheit.
- Erweiterte Untersuchungen zur Modellierung und Kontrolle der Eigenschaften von sortiertem Bauholz.
- Modellierung von Hochleistungsholzmaterialien, wie Brettschichtholz.
- Einfluss periodisch wechselnder Klima- und Lastbedingungen auf das Tragverhalten von Holzbauelementen.
- Das Verformungs- und Tragverhalten von Holzverbindungen.
- Modellierung der Dauerhaftigkeit von Holzbauelementen.

Des Weiteren sollte der Fokus der Forschungsaktivitäten ausgeweitet werden auf die Problematik der Beurteilung bestehender Bauwerke. Dies beinhaltet:

- Die Identifizierung geeigneter zerstörungsfreier bzw. zerstörungsarmer Prüfmethode in situ.
- Modellierung der Aussage dieser Tests; wie lassen sich Modelle für die Tragfähigkeit mit der neuen Information aus den Tests aktualisieren?

Die hier genannten Forschungsthemen sind zentraler Gegenstand des Europäischen Forschungsprojektes COST E55 [4].

Ein wichtiger Aspekt bei der Identifikation von Forschungszielen ist die Analyse von Fällen, bei welchen Holzbauwerke nachweislich die Anforderungen bezüglich Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit oder/und Dauerhaftigkeit nicht erfüllt haben – die Analyse von Schäden und Einstürzen.

Systematische Schadenserfassung

Die Analyse und Wertung der akkumulierten Ingenieur Erfahrung spielt eine wichtige Rolle bei der Beurteilung und Weiterentwicklung bestehender ‚Best Practice‘ Methoden. (‚Best Practice‘ wird hier im Sinne der allgemein anerkannten Regeln der Technik verstanden, d.h. man versteht darunter Regeln, die auf wissenschaftlichen Grundlagen oder auf fachlichen Erkenntnissen beruhen, sich in der Praxis bewährt und allgemein durchgesetzt haben und damit Gedankengut der auf dem betreffenden Fachgebiet tätigen Personen geworden sind.) ‚Best Practice‘ ist durch die Grundpfeiler in Abbildung 1 manifestiert; die Bemessungsrichtlinien sind also nur ein Teil davon.

Akkumulierte Ingenieur Erfahrung besteht allgemein aus ‚guter‘ und ‚schlechter‘ Erfahrung, wobei ‚gute‘ Erfahrung in den seltensten Fällen systematisch erhoben und analysiert wird. Die Erfahrung, welche in Form von Analysen und Untersuchungen festgehalten wird, ist zum aller größten Teil ‚schlechte‘ Erfahrung. Diese Besonderheit sollte beim Ziehen von Rückschlüssen in jedem Fall berücksichtigt werden. Werden zum Beispiel 100 Schadensfälle betrachtet und in 90 der Fälle war das Bauteil A mangelhaft und in 10 Fällen war das Bauteil B mangelhaft, bedeutet das nicht in jedem Fall, dass das Bauteil A das ernstere Problem ist. Wird das gesamte Bauvolumen betrachtet und in quasi jedem Bauwerk kommt Bauteil A mehrmals vor, Bauteil B hingegen ist nur in 2% aller Bauwerke vorhanden, würde das bedeuten, dass Bauteil B relativ gesehen zu mehr Schäden führt.

In der Literatur ist eine Vielzahl von Schadenserfassungen zu finden. Beispiele hierfür sind Matousek und Schneider [5], Smith [6] und Allen [7]. Aktuelle Studien widmen sich speziell Holzbauwerken; Frühwald et al. [8] und Frese und Blaß [9].

Die Studien sind aufschlussreich, die Ergebnisse der verschiedenen Studien lassen sich aber im Detail nicht gegenüberstellen. Die Kriterien, mit denen das Versagen und die Fehler beschrieben wurden, sind nicht einheitlich und machen den direkten Vergleich und die gemeinsame Betrachtung der Ergebnisse unmöglich. Aus diesem Grund war es ein Anliegen innerhalb des Europäischen Forschungsprojektes COST E55 [4] eine Methodik der systematischen Schadenserfassung zu entwickeln. Nach der Methodik werden Bauwerk und Bauteile, welche mit dem Schaden assoziiert sind, einheitlich beschrieben. Ebenso wird die Exposition des Bauwerks und des Bauteils beschrieben und eingeordnet. Es wird auf die Art des Versagens eingegangen – handelt es sich um ein progressives Versagen oder war der Schaden lokal begrenzt.

Ein wichtiger Aspekt bei der Schadenserfassung ist die detaillierte Beschreibung der Schadensursache. Die Schadensursache lässt sich hierbei grob unterteilen in:

- Ungünstige Kombinationen von Einwirkung und Widerstand, und
- Fehler.

Fehler wiederum lassen sich unterscheiden in fehlerhafte ‚Best Practice‘ Methoden, oder Verletzung der ‚Best Practice‘.

Werden die Ursachen von Schäden angemessen und einheitlich beschrieben, lassen sich die Rückschlüsse aus Schadenserfassung direkt bei der Weiterentwicklung von ‚Best Practice‘ Methoden anwenden. Dies beinhaltet auch erweiterte Maßnahmen der Qualitätskontrolle zur Einschränkung von groben Fehlern.

Referenzen

- [1] Köhler, J. (2005) Reliability of Timber Structures. ETH Zurich, Dissertation.
- [2] Köhler, J., Sørensen, J.D. and Faber, M.H. (2006) Probabilistic modelling of timber structures. *Journal of Structural Safety* Volume 29, Issue 4, October 2007, Pages 255-267.
- [3] Joint Committee of Structural Safety. Probabilistic Model Code, Internet Publication: www.jcss.ethz.ch, 2006.
- [4] COST E55 ‚Modeling the Performance of Timber Structures‘ 2006-2009 www.cost-e55.ethz.ch/
- [5] Matousek M. and Schneider J. (1976) Untersuchungen zur Struktur des Sicherheitsproblems bei Bauwerken. Bericht Nr. 59, IBK, Zürich, Feb. 1976.
- [6] Smith D. W. (1976) Bridge Failures. *Proceedings Institute of Civil Engineers*, Vol. 60.
- [7] Allen D. E. (1979) Errors in Concrete Structures. *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 6, No. 3, Sept. 1979, pp. 465-467.
- [8] Frühwald E., Serrano E., Toratti T., Emilsson A. and Thelandersson S. (2008) Design of safe timber structures – How can we learn from structural failures in concrete, steel and timber? Research Report TVBK-3053, Lund University, ISSN 0349-4969.
- [9] Frese M. and Blaß H.-J. (2008) Failure Analysis on timber structures in Germany – Recording data and pointing the way statements. Research report. To be published 2008.