

Risikobasierte Inspektionsstrategien für den optimalen Unterhalt von Tragwerken

Inspektionen eines Bauwerks erlauben die Reduktion von Unsicherheiten, welche mit der Beurteilung des Bauwerkzustands verbunden und insbesondere für Schädigungsprozesse wie Ermüdung und Korrosion sehr hoch sind. Im vorliegenden Artikel wird auf diese Unsicherheiten eingegangen. Es wird gezeigt, welchen Einfluß Inspektionen haben und wie dieser quantifiziert werden kann. Anhand eines ermüdungsbeanspruchten Bauteils wird dargestellt, wie die mit Inspektionen verbundene Risikoreduktion und somit der Nutzen einer Inspektions- und Unterhaltsstrategie bestimmt werden können. Schließlich wird ein Überblick über einige aktuelle Anwendungen der risikobasierten Planung von Inspektionen (RBI) für Offshore-Anlagen unter Ermüdung präsentiert.

Risk based inspection planning for structural systems. *Inspections may reduce the uncertainties related to the integrity of structures. These uncertainties, which are particularly large for deterioration processes such as fatigue and corrosion, are discussed in the paper. It is demonstrated how the reduction of uncertainties through inspections can be modeled and quantified. Exemplified by a joint subject to fatigue it is shown how the associated risk reduction, and therefore the benefits of an inspection strategy, can be determined. Finally an overview on some recent applications of the methodology for offshore structures subject to fatigue is presented.*

1 Einführung

Bauwerke altern, da sie Schädigungsprozessen wie Korrosion und Ermüdung ausgesetzt sind. Viele der auftretenden Schäden könnten zwar durch einen besseren Entwurf vermieden werden, vollständig verhindern lassen sie sich aber nicht, weil die relevanten Mechanismen und Einflußparameter für die meisten Bauwerke und Schädigungsprozesse nur teilweise bekannt sind. Die Modellierung und Vorhersage der Bauwerksalterung sind daher großen Unsicherheiten unterworfen. Inspektionen und Überwachung können diese Unsicherheiten reduzieren und sind deshalb in vielen Fällen ein effizientes Mittel zur Risikoreduktion.

Der Lebenszyklus eines Bauwerks kann in verschiedene Phasen aufgeteilt werden, wie dies in Bild 1 dargestellt ist. In jeder Phase müssen Entscheidungen getroffen werden, welche das Verhalten des Bauwerks beeinflussen, im Speziellen die Alterung und die Entstehung von Schäden. Die einzelnen Phasen werden durch verschiedene Parameter charakterisiert; diese sind oft unsicher, manchmal

sogar unbekannt. Dies führt dazu, daß der Zustand des Bauwerks, respektive der Fortschritt der Schädigungen, ebenfalls eine unsichere Größe ist. In Bild 1 sind die verschiedenen unsicheren Parameter dargestellt, welche das Verhalten des Bauwerks inklusive der Schädigungen beeinflussen können.

Alle Entscheidungen, welche getroffen werden müssen, erfolgen also unter unsicheren Randbedingungen. Mit Hilfe der Bayesschen Entscheidungstheorie [1], [2] ist es möglich, den Einfluß von solchen Entscheidungen zu beurteilen, den erwarteten Nutzen einer bestimmten Strategie zu berechnen und damit den Lebenszyklus eines Bauwerks zu optimieren. Im vorliegenden Artikel wird die Entscheidungstheorie nur für die Planung und Optimierung von Inspektionen und Reparaturen verwendet; die Entscheidungen in den anderen Phasen des Lebenszyklus können aber auf die gleiche Weise optimiert werden.

Nach einer kurzen Einführung in die Modellierung von Schädigungen und deren Unsicherheiten wird der Einfluß von Inspektionen und Reparaturen dargestellt. Danach wird die Bayessche Entscheidungstheorie eingeführt und zusammen mit den Schädigungs- und Inspektionsmodellen zur Planung von Inspektionen eingesetzt. Dabei werden kostenoptimale Lösungen ermittelt, welche Risikoakzeptanzkriterien erfüllen müssen, die einem minimalen Sicherheitsniveau entsprechen. Die gesamte Methodik wird



Bild 1. Unsicherheiten im Lebenszyklus eines Bauwerkes
Fig. 1. Uncertain factors during the life-cycle of an engineering structure

an einem Beispiel dargestellt. Der Beitrag endet mit einem Überblick über verschiedene Anwendungen und einem Ausblick auf die zukünftigen Entwicklungen in der Forschung und der Praxis.

2 Bauwerksschädigungen und ihre Modellierung

Die Modellierung von Bauwerksschäden ist ein wichtiges Forschungs- und Anwendungsgebiet des Ingenieurwesens. Trotzdem sind die bestehenden, praktisch anwendbaren Modelle zur quantitativen Vorhersage der Schädigungsentwicklung für die meisten Mechanismen ziemlich rudimentär und unterliegen großen Unsicherheiten. Dies rührt daher, daß bei Schädigungsprozessen meist mechanische und chemische Abläufe zusammenkommen und unterschiedlichste, von Fall zu Fall variierende Parameter den Schädigungsfortschritt beeinflussen.

Im vorliegenden Beitrag werden Schädigungsmodelle nur exemplarisch und in vereinfachter Form verwendet. Ein Überblick über die quantitative Modellierung von Schädigungsprozessen ist aber z. B. in [3] zu finden.

2.1 Unsicherheiten in der Schädigung des Bauwerks

Die Unsicherheiten in der Modellierung von Schädigungsprozessen und ihren Auswirkungen haben ihren Ursprung in allen Phasen des Lebenszyklus. Im folgenden werden die Unsicherheiten aufgelistet, welche einen Einfluß auf die Schädigungen haben.

In der Entwurfsphase bestehen zwei grundsätzliche Arten von Unsicherheiten: Es gibt Schädigungsprozesse, welche gar nicht identifiziert werden, sei es, weil sie zum Zeitpunkt des Entwurfs objektiv nicht bekannt sind, sei es weil sie vom Ingenieur nicht erkannt oder vernachlässigt werden. Prozesse, welche erkannt sind, werden durch qualitative oder quantitative Modelle beschrieben und im Entwurf berücksichtigt, explizit (z. B. durch den Nachweis eines genügenden Ermüdungswiderstandes) oder implizit (z. B. durch die Einhaltung der minimalen Betonüberdeckung der Bewehrung). Diese Modelle unterliegen aber oft großen Unsicherheiten, da sie die Schädigungsprozesse nur vereinfacht wiedergeben und nicht alle Einflußparameter berücksichtigen.

In der Ausführungsphase kommen zusätzliche Unsicherheiten hinzu, welche von Ungenauigkeiten in der Ausführung und von nicht dokumentierten Abweichungen zwischen dem geplanten und dem ausgeführten Bauwerk herrühren. Diese Unsicherheiten sind eine Funktion der Qualitätskontrolle im Bauprozeß. Zudem ist das Bauwerk während der Bauphase oft Einwirkungen, welche in der Bemessung nicht berücksichtigt werden, ausgesetzt; diese sind eine weitere Ursache für Unsicherheiten in den Schädigungsmodellen.

Während des Betriebs wird der Verlauf der Schädigungen durch verschiedene Einwirkungen auf das Bauwerk bestimmt, welche fast alle zumindest teilweise unsicher sind. Dies trifft auf natürliche Einwirkungen (wie Wind und Wellen oder die Chloridbelastung in Meeresnähe) und auf technisch-menschliche Einwirkungen (wie Streusalz oder die mechanische Belastung von Druckbehältern) zu.

Wird eine Reparatur durchgeführt, dann reduziert oder behebt diese zwar in der Regel die Schädigung. Auch Re-

paraturen sind aber mit großen Unsicherheiten verbunden. Oft sind keine oder nur rudimentäre Modelle vorhanden, welche den Effekt einer Reparatur, inklusive den Schädigungsverlauf danach, beschreiben. Zudem ist die Qualitätskontrolle bei der Ausführung von Reparaturen oft geringer als bei der Installation, was zu weiteren Unsicherheiten führt.

Nachfolgend werden die Unsicherheiten am Beispiel einer Offshore-Plattform, welche Ermüdung ausgesetzt ist, illustriert.

2.2 Unsicherheiten bei der Ermüdungs-Modellierung

Ermüdung ist eine bekannte Bauwerksschädigung, und die Modellierung reicht zurück bis in die Mitte des 19. Jahrhunderts, als viele Versagen in der Eisenbahnindustrie auftraten [4]. Ermüdung wird in der Bemessung in der Regel explizit berücksichtigt durch einen Ermüdungsnachweis, etwa nach Eurocode 3 [5]. Dieser basiert auf der *Wöhlerkurve* und der Schadensakkumulationsregel von *Palmgren* [6] und *Miner* [7]. Da dieses Modell viele Parameter nicht berücksichtigt, ist die Vorhersage der Schädigung großen Streuungen unterworfen. Dies wird im Entwurf berücksichtigt, indem die 95 %-Fraktile der *Wöhlerkurven* verwendet werden, d. h. daß diese Kurven die Dauerfestigkeit in 95 % der Fälle unterschätzen. Zudem wird in der Regel ein Sicherheitsfaktor verlangt. Alternativ können Ermüdungsmodelle, welche auf der Bruchmechanik basieren, verwendet werden. Diese beinhalten zusätzliche Parameter, wie z. B. die initiale Rißgröße a_0 , d. h. die Größe des Schadens zum Zeitpunkt Null. Diese ist eine Funktion der Verarbeitungsqualität, d. h. der Ausführungsqualität. Solche Modelle werden für die Planung von Inspektionen verwendet, da sie Angaben zur (meßbaren) Größe eines Schadens machen.

Die einfachste Form des auf *Paris* und *Erdogan* [8] beruhenden Rißwachstumsgesetzes wird geschrieben als:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \{\Delta K[a(N)]\}^m$$

$a(N)$ ist die Rißtiefe nach N Spannungszyklen, $\Delta K(a)$ ist die Amplitude des Spannungsintensitätsfaktors, welcher das Spannungsfeld um die Rißspitze beschreibt. C und m sind Parameter, welche als Funktion des Materials und der Umgebung empirisch bestimmt werden. Nach *Gurney* [9] hängen diese zwei Parameter in der folgenden Form voneinander ab:

$$\ln C = -15,84 - 3,34m \quad (2)$$

Die Differentialgleichung kann nun mit der Randbedingung $a(N=0) = a_0$ nach $a(N)$ aufgelöst werden. Für reale Anwendungen wird oft auch ein zweidimensionales Rißwachstumsgesetz verwendet, z. B. *Pedersen et al.* [10] oder *Straub* [3].

$\Delta K(a)$ kann (vereinfacht) berechnet werden zu:

$$\Delta K(a) = \Delta \sigma_e \sqrt{\pi a} \cdot Y, \quad (3)$$

wobei $\Delta \sigma_e$ die schadensäquivalente Spannungsamplitude und Y einen Korrekturfaktor (Modellunsicherheit) darstellt, welcher hier unabhängig von der Rißtiefe a ist. Bei Ver-

wendung dieses vereinfachten Modells ergibt sich aus Gl. (1) eine explizite Lösung für die Rißtiefe als Funktion der Zeit:

$$a(T) = \left[a_0^{(2-m)/2} + \frac{2-m}{2} C (Y\pi^{1/2}\Delta\sigma_e)^m vT \right]^{2/(2-m)} \quad \text{für } m \neq 2 \quad (4)$$

$$= a_0 \exp(C\pi\Delta\sigma_e^2 vT) \quad \text{für } m = 2$$

wobei v die Anzahl Spannungszyklen pro Jahr und vT die Anzahl Spannungszyklen in der Zeit T darstellt.

Die in den Gln. (1) bis (4) enthaltenen Parameter sind unsicher. Die Unsicherheiten in den Parametern C und m widerspiegeln die Modellunsicherheit und sind mit der Entwurfsphase verbunden, die Unsicherheit in der initialen Rißgröße a_0 ist eine Funktion der Ausführungsqualität und die Unsicherheit in der Funktion $\Delta K(a)$, welche die effektiven Spannungen in der Ausführungs- und der Betriebsphase beschreibt, ist mit den Unsicherheiten in ebendiesen Phasen verbunden.

Mit Hilfe der strukturellen Zuverlässigkeitsanalyse oder mit Simulationen, siehe *Madsen et al. [11]*, *Melchers [12]* oder *Faber [13]*, läßt sich nun die Versagenswahrscheinlichkeit als Funktion der Zeit berechnen. Dabei wird angenommen, daß ein Versagen eintritt, wenn der Riß die Materialdicke d erreicht. Die zu diesem Zeitpunkt

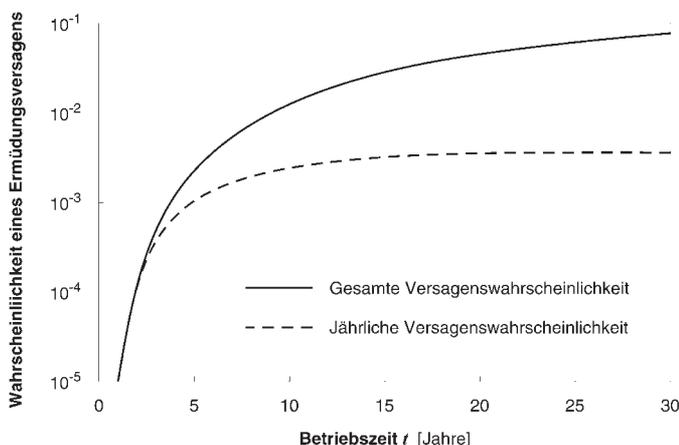


Bild 2. Versagenswahrscheinlichkeit des Beispiелеlements
Fig. 2. Probability of failure of the considered element

Tabelle 1. Parameter des exemplarischen Rißwachstumsmodells
Table 1. Parameters of the example crack growth model

Parameter	Beschreibung	Dimension	Verteilung	Mittelwert	Standardabweichung
v_e	Anzahl Spannungszyklen pro Jahr	yr^{-1}	D	$6 \cdot 10^6$	
$\Delta\sigma_e$	Spannungsamplitude	Nmm^{-2}	LN	26,62	5,32
$\ln C$	Material-Parameter	entsprechend N & mm	N	-29,78	0,77
m	Material-Parameter	-	gemäß Gleichung (2)		
Y	Korrekturfaktor	-	LN	1,44	0,1
a_0	Initielle Rißgröße	mm	EXP	0,38	0,38
d	Material-Dicke	mm	D	32	

D: Deterministisch; LN: Lognormalverteilung; N: Normalverteilung; EXP: Exponentialverteilung

noch vorhandene Restfestigkeit, welche wiederum eine unsichere Größe ist, wird hier vernachlässigt, ebenso wie ein allfälliges sprödes Versagen des Bauteils.

Die Grenzzustandsgleichung wird somit geschrieben als:

$$g_F(\mathbf{X}, T) = d - a(\mathbf{X}, T) \quad (5)$$

$a(\mathbf{X}, T)$ wird nach Gl. (4) berechnet, wobei \mathbf{X} der Vektor aller Zufallsvariablen darstellt. Die Versagenswahrscheinlichkeit $p_F(T)$ berechnet sich durch Integration über alle Bereiche, welche einem Versagen entsprechen zu:

$$p_F(T) = P(g_F(\mathbf{X}, T) \leq 0) = \int_{g(\mathbf{X}, T) \leq 0} f_x(\mathbf{x}) d\mathbf{X} \quad (6)$$

$f_x(\mathbf{x})$ ist die gemeinsame Wahrscheinlichkeitsdichte aller Zufallsvariablen. Zur numerischen Illustration sind in der Tabelle 1 Parameter-Werte angegeben. Bild 2 zeigt die Versagenswahrscheinlichkeit, welche mit Hilfe der First-Order Reliability Method (FORM) berechnet wurde.

Wenn sprödes Versagen berücksichtigt werden muß, dann ist die Materialdicke in Gl. (5) durch die kritische Rißlänge a_{cr} zu ersetzen, welche mit dem R6-Konzept ermittelt werden kann, *Milne et al. [14]*. Dies ist aber möglichst zu vermeiden, da in diesem Fall die schadensäquivalente Spannungsamplitude $\Delta\sigma_e$ durch den effektiven Spannungsprozeß zu ersetzen ist und die Versagenswahrscheinlichkeit nur noch mit zeit-varianter Zuverlässigkeitsanalyse gelöst werden kann, siehe auch *Madsen et al. [11]*. Es sei zudem daran erinnert, daß auch die *Wöhlerkurven* in der Regel auf einer ungenauen Definition des Bauteilversagens basieren und für die Planung der Inspektionen (im Gegensatz zur Beurteilung beobachteter Schäden) häufig keine größere Genauigkeit erforderlich ist.

Die jährliche Wahrscheinlichkeit $\Delta p_F(T)$, welche ebenfalls in Bild 2 dargestellt wird, berechnet sich aus der totalen Versagenswahrscheinlichkeit zu:

$$\Delta p_F(T) = \frac{p_F(T) - p_F(T - 1 \text{ yr})}{1 - p_F(T - 1 \text{ yr})} \quad (7)$$

Analoge Modelle sind in der Literatur für verschiedene Schädigungsprozesse dokumentiert, z. B. für die Bewehrungskorrosion unter Chloridbelastung und bei Karbonatisierung [15], oder für die Korrosion in Pipelines unter CO_2 -Einfluß [16].

3 Bedeutung und Modellierung von Inspektionen, Bauwerksüberwachung und Reparaturen

Um die Unsicherheit über den effektiven Zustand des Bauwerks zu reduzieren, werden Inspektionen und in geeigneten Fällen auch Überwachungen (Monitoring) durchgeführt. Während Inspektionen Informationen über den Zustand zu einem bestimmten Zeitpunkt liefern, erlauben Überwachungen die Beobachtung über einen längeren Zeitraum hinweg. Überwachungen sind dafür in der Regel auf wenige Punkte des Bauwerks beschränkt, während Inspektionen eine großflächige Übersicht ermöglichen. In der Folge wird nicht näher auf die Überwachung eingegangen. Grundsätzlich folgt die Behandlung von Informationen aus einer Bauwerksüberwachung aber der hier vorgestellten Verwendung von Informationen aus Inspektionen, auch wenn die zusätzliche zeitliche Dimension die Analyse mathematisch anspruchsvoller macht.

3.1 Inspektionsqualität

Inspektionen dienen dem Zweck, gegenwärtige oder zukünftige Schädigungen des Bauwerks zu entdecken und nach Möglichkeit zu beschreiben. Die Wahrscheinlichkeit, daß ein gegebener Schaden identifiziert wird, ist daher ein Maß für die Qualität einer Inspektion. Diese Größe, welche als Probability of Detection, PoD, bekannt ist, ist deshalb seit etwa 30 Jahren der wichtigste, quantitative Indikator für die Beschreibung der Inspektionsqualität und wurde anfänglich zur Hauptsache in der Flugzeug-, der Atom- und der Offshore-Industrie entwickelt und benutzt; ein Überblick ist in [17] oder [18] zu finden. Der PoD für eine bestimmte Inspektionsmethode ist abhängig von verschiedenen Parametern des Schadens aber auch der Umgebung. Da der PoD anfänglich ausschließlich für die Beschreibung von Inspektionen zur Entdeckung von Rissen verwendet wurde, wird er in der Regel als Funktion der Rißtiefe oder -länge angegeben, je nachdem, welches der für die Methode entscheidende Parameter ist. In Bild 3 sind zwei solcher Funktionen dargestellt. Während die Funktion aus *Straub* [19] im Rahmen eines Industrieprojektes aus Labor- und Feldversuchen ermittelt wurde, stammt die Funktion aus *Moan* et al. [20] aus der Kalibrierung von Beobachtungen von real durchgeführten Inspektionen an Offshore-Bauwerken.

Für das Beispiel wird die PoD-Kurve gemäß *Moan* et al. [20], aufgrund ihrer mathematisch einfacheren Form verwendet. Diese Kurve folgt der Exponentialverteilung:

$$PoD(a) = 1 - \exp(-\lambda_D a) \tag{8}$$

Der Parameter dieser Funktion ist gegeben durch $1/\lambda_D = 1,95$ mm.

Für Inspektionen bei anderen Arten von Schäden muß das in Bild 3 dargestellte Konzept sinngemäß übertragen werden, da dort andere Parameter als die Rißtiefe entscheidend sind. In *Wicki* et al. [21] werden z. B. quantitative Inspektionsqualitätsmodelle für Betonbauwerke mit Bewehrungskorrosion präsentiert. Immer aber sind die Modelle von der allgemeinen Form $P(z|\theta)$, d. h., sie beschreiben die Wahrscheinlichkeit eines Inspektionsresultates z für einen gegebenen Zustand des Bauteils θ .

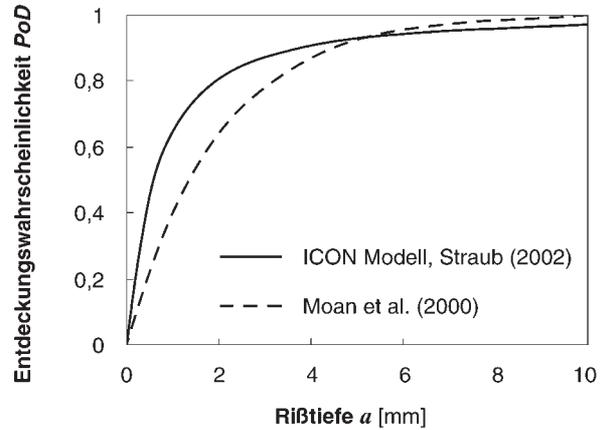


Bild 3. PoD-Funktionen für Magnetpulverprüfung zur Entdeckung von Rissen in geschweißten Rohrquerschnitten unter Wasser

Fig. 3. Probability of Detection (PoD) for Magnetic Particle Inspection (MPI) of welded tubular members underwater

3.2 Aktualisieren von Schädigungsmodellen mit Inspektionsresultaten

Nach einer Inspektion können die Schädigungsmodelle mit Hilfe der Resultate aktualisiert werden. Da sowohl das Schädigungsmodell als auch die Inspektionsqualität mit Unsicherheiten behaftet sind, geschieht die Aktualisierung in einem probabilistischen Format mit Hilfe des Satzes von *Bayes*, wie dies etwa in [22] oder in [23] ausgeführt ist. Der Satz von *Bayes* erlaubt es, a-priori Informationen (das ursprüngliche Schädigungsmodell) mit zusätzlichen Informationen zu einem a-posteriori-Modell zu kombinieren. Der Satz von *Bayes* lautet in seiner allgemeinen Form:

$$f_{\Theta}''(\theta|z) = P(z|\theta) f_{\Theta}'(\theta) c \tag{9}$$

mit der Konstante

$$c = \frac{1}{\int_{\Theta} P(z|\theta) f_{\Theta}'(\theta) d\theta} \tag{10}$$

$f_{\Theta}'(\theta)$ ist die a-priori-Verteilung und $f_{\Theta}''(\theta|z)$ die a-posteriori-Verteilung gegeben das Ereignis z , welches zum Beispiel der Entdeckung eines Schadens bei der Inspektion entsprechen kann.

Der Satz von *Bayes* kann auch mit Hilfe der strukturellen Zuverlässigkeitsanalyse angewandt werden. In diesem Fall muß das Inspektionsresultat mit einer Grenzzustandsgleichung beschrieben werden. Für das Ereignis „kein Schaden entdeckt“ wird diese gemäß *Hong* [24] geschrieben als:

$$g_{ND}(\mathbf{X}, T_{insp}) = u - \Phi^{-1}\{PoD[a(T_{insp})]\} \tag{11}$$

wobei u eine standardnormalverteilte Zufallsvariable, T_{insp} der Zeitpunkt der Inspektion und $\Phi^{-1}(\cdot)$ die Inverse der Standardnormalverteilung ist. Bild 4 zeigt die Verteilung der Rißtiefe nach $T = 5$ Jahren, vor und nach einer Inspektion, gemäß dem in Abschn. 2.2 eingeführten Schädigungsmodell.

Der Satz von Bayes ermöglicht es auch, die Zuverlässigkeit (bzw. die Versagenswahrscheinlichkeit) direkt zu aktualisieren [22], [23]. Für das vorliegende Beispiel ist die resultierende aktualisierte Versagenswahrscheinlichkeit für den Fall einer Inspektion im Jahre 10 ohne Indikation in Bild 5 dargestellt.

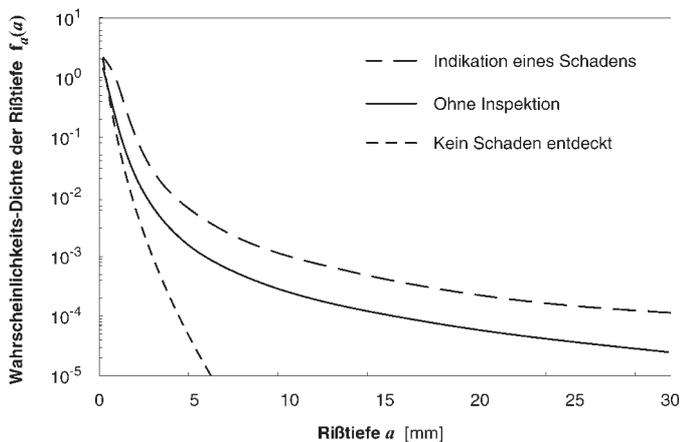


Bild 4. Die Wahrscheinlichkeitsdichte der Rißtiefe a nach $T = 5$ Jahren, ohne Inspektion und nach einer Inspektion
Fig. 4. Probability density function of the crack depth a at $T = 5$ years, without inspection and with an inspection resulting in either indication or no-indication

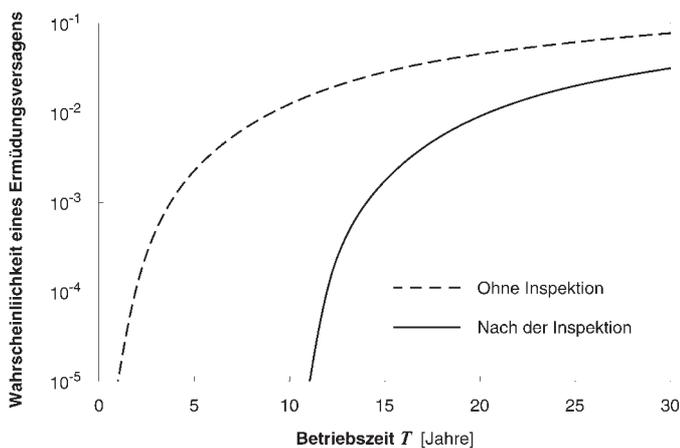


Bild 5. Die Versagenswahrscheinlichkeit nach der Inspektion im Jahre 10, bei welcher kein Schaden festgestellt wird
Fig. 5. Probability of failure after the inspection at $T = 10$ years, resulting in no-detection

4 Planung von Inspektionen unter Berücksichtigung von Risikoakzeptanz

Inspektionen werden durchgeführt, um sicherzustellen, daß ein Bauwerk den Sicherheitsanforderungen genügt. Diese Anforderungen sind entweder durch Normen oder durch den Besitzer oder Betreiber des Bauwerks festgelegt. Inspektionen werden in vielen Normen bei der Festlegung der notwendigen Sicherheitsmarge berücksichtigt. In der Schweizerischen Stahlbaunorm SIA 263 [25] wird festgelegt: „Der Widerstandsbeiwert der Ermüdungsfestigkeit γ_{MF} ist abhängig von der Zugänglichkeit für Inspektionen, Maßnahmen und dem im Versagensfall zu erwartenden Schaden zu wählen.“

In Eurocode 3 [5] sind die Teilsicherheitsbeiwerte ebenfalls explizit als Funktion der Zugänglichkeit aufgeführt. In Tabelle 2 ist der Sicherheitsfaktor aus dem NORSOK Standard N-004 [26], der norwegischen Offshore-Stahlbau-Norm, aufgeführt. Der Sicherheitsfaktor bezieht sich hier auf das Ermüdungsleben und nicht, wie in Eurocode 3 und SIA 263, auf die Spannungsamplituden. In NORSOK N-004, wie auch in den anderen Normen, ist allerdings nicht definiert, wie oft Inspektionen durchgeführt werden sollen.

Jeder Sicherheitsfaktor entspricht implizit einer bestimmten Versagenswahrscheinlichkeit. Dies wird bei Betrachtung des Beispiелеments ersichtlich: Nach der in NORSOK N-004 verwendeten Definition hat dieses Bauteil bei einer Nutzungsdauer von 30 Jahren einen Sicherheitsfaktor von $FDf = 2$. Gemäß Bild 1 entspricht dieser Faktor einer Versagenswahrscheinlichkeit von ca. 8 % während der Lebensdauer. Wenn nun die erwartete Amplitude der Spannungszyklen oder die Anzahl Spannungszyklen variiert werden, dann ergeben sich verschiedene Sicherheitsfaktoren mit den zugehörigen Versagenswahrscheinlichkeiten. Auf diese Weise läßt sich die Beziehung zwischen diesen zwei Größen ermitteln. Für das Beispiелеlement ist diese Beziehung in Bild 6 dargestellt.

Aus Bild 6 wird ersichtlich, daß die Bedingung, der Sicherheitsfaktor müsse größer als 10 sein, für das Beispiелеlement äquivalent ist zu der Bedingung, daß die jährliche Versagenswahrscheinlichkeit während der Betriebsdauer $2 \cdot 10^{-4} \text{yr}^{-1}$ nicht überschreiten darf. Da ein Sicherheitsfaktor von 10 dem Fall des nicht inspizierbaren Bauteils entspricht, bei welchem die Versagenswahrscheinlichkeit folglich nicht reduziert werden kann, wird dieser Wert als das dieser Norm entsprechende Akzeptanzkriterium interpretiert (für Bauteile mit hohen Konsequenzen bei einem Versagen); dieser Ansatz wird z. B. in Faber et al. [27] oder

Tabelle 2. Erforderliche Sicherheitsfaktoren bei Ermüdung (Fatigue Design Factor FDf) gemäß Norsok N-004 (1998)

Table 2. Required Fatigue Design Factors (FDf) according to Norsok N-004 (1998)

Klassifizierung des Bauteils nach der Konsequenz eines Versagens	Zugang für Inspektionen und Reparatur		
	Kein Zugang (oder im Spritzwasserbereich)	Zugänglich	
		Unter Wasser	Über Wasser
Beträchtliche Konsequenzen	10	3	2
Geringe Konsequenzen	3	2	1

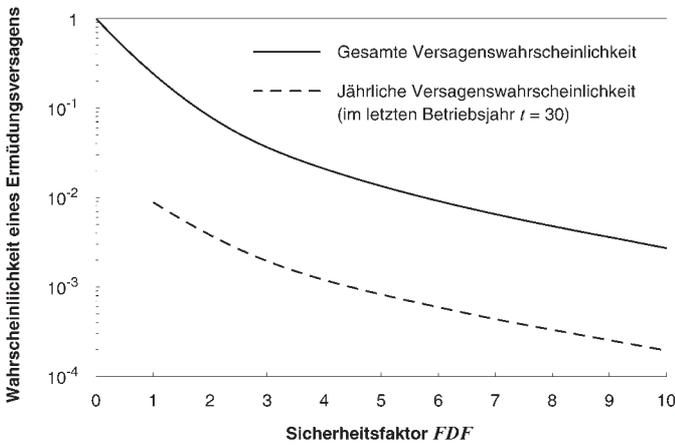


Bild 6. Beziehung zwischen dem Sicherheitsfaktor FDF und der Versagenswahrscheinlichkeit während der Betriebsdauer (30 Jahre) und im letzten Betriebsjahr für das Beispielerement Fig. 6. Relation between the fatigue design factor (FDF) and the probability of failure during the service life (30 years) and in the last year of service for the example case

Moan und Vårdal [28] angewandt. In Übereinstimmung mit Rackwitz [29] wird die jährliche Versagenswahrscheinlichkeit (bezeichnet mit Δp_F^{acc}) verwendet, um das Risikoakzeptanzkriterium auf eine einheitliche Referenzperiode zu beziehen.

Die Bestimmung von solchen Akzeptanzkriterien erlaubt es nun, den notwendigen Inspektionsaufwand, welcher in den Normen nicht definiert ist, explizit zu bestimmen. Dazu wird die jährliche Versagenswahrscheinlichkeit berechnet. Wenn in einem Jahr die zulässige Versagenswahrscheinlichkeit Δp_F^{acc} überschritten wird, muß im vorhergehenden Jahr eine Inspektion durchgeführt werden. Unter der Annahme, daß bei keiner Inspektion ein Riß festgestellt wird, kann mit Hilfe des zuvor beschriebenen Satzes von Bayes die Versagenswahrscheinlichkeit zu jedem Zeitpunkt, und somit auch alle notwendigen Inspektionen während der Lebensdauer, berechnet werden. Dies ist aber nur solange gültig, als kein Riß entdeckt wird. Im Falle der Entdeckung müssen eine Reparatur durchgeführt und die Inspektionszeiten danach neu bestimmt werden. In Bild 7 ist die Bestimmung der Inspektionszeiten für das Beispielerement dargestellt, mit dem Akzeptanzkriterium $\Delta p_F^{acc} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ yr}^{-1}$.

5 Berechnen und Optimieren von Lebens-Zyklus-Kosten

Mit Hilfe der Bayesschen Entscheidungstheorie lassen sich, basierend auf den zuvor berechneten Versagenswahrscheinlichkeiten, die erwarteten Kosten für eine bestimmte Inspektionsstrategie ermitteln. Werden diese für verschiedene Strategien bestimmt, kann auf diese Weise die kostenoptimale Strategie identifiziert werden.

Eine Inspektionsstrategie kann z. B. durch die Wahl einer bestimmten Inspektionsmethode und einer bestimmten maximal akzeptierten jährlichen Versagenswahrscheinlichkeit gegeben sein. Die Inspektionszeiten sind dann gemäß Bild 7 automatisch gegeben. Zusätzlich müssen auch Reparaturkriterien festgelegt werden, d. h., es muß festgelegt werden, bei welchem Inspektionsresultat eine Reparatur durchgeführt wird. Diese Strategien können grafisch als Entscheidungsbäume dargestellt werden. Für den betrachteten Fall ist ein solcher Baum in Bild 8 dargestellt. Dieser beruht auf der Annahme, daß ein repariertes Bauteil sich wie ein neues Bauteil verhält.

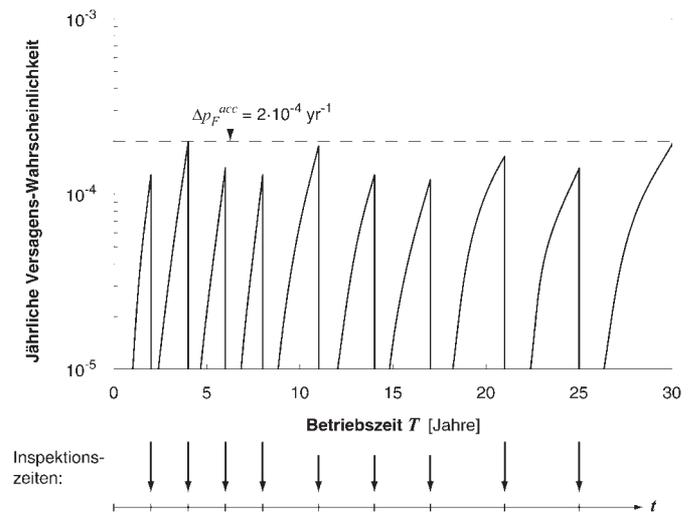


Bild 7. Jährliche Versagenswahrscheinlichkeit und Inspektionszeiten, welche das Akzeptanzkriterium $\Delta p_F^{acc} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ yr}^{-1}$ erfüllen

Fig. 7. Failure rate and inspection times which comply with the acceptance criterion $\Delta p_F^{acc} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ yr}^{-1}$

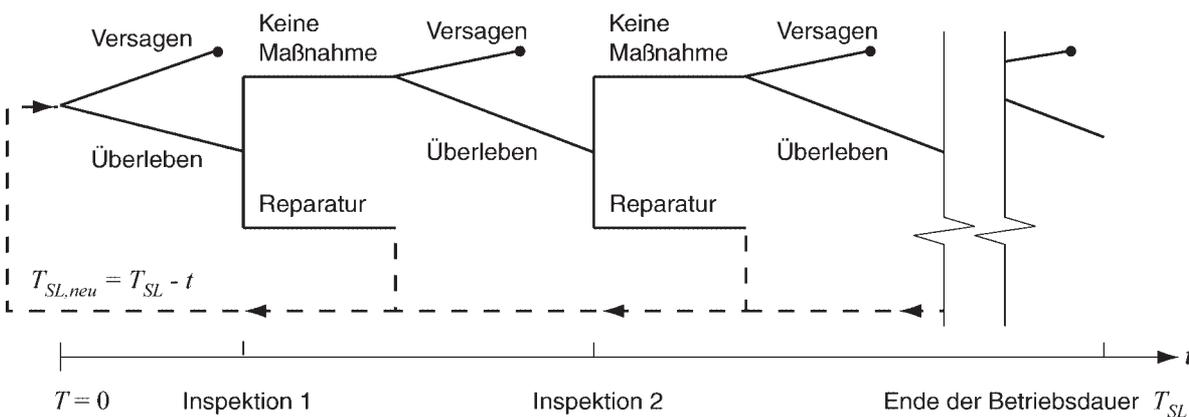


Bild 8. Entscheidungsbaum für die Berechnung der erwarteten Kosten einer Inspektionsstrategie Fig. 8. Decision tree for the calculation of the expected cost of an inspection strategy

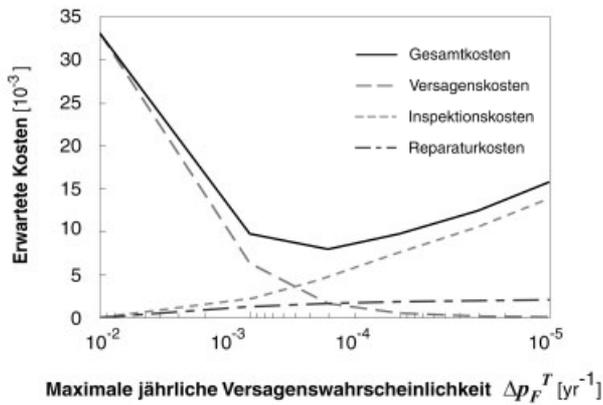


Bild 9. Erwartete Kosten während der gesamten Lebensdauer berechnet für das Beispiелеlement, für verschiedene Strategien (entsprechend maximalen jährlichen Versagenswahrscheinlichkeiten)

Fig. 9. Expected cost during the service life for the considered element, calculated for different inspection strategies (as defined by the threshold on the annual probability of failure)

Indem für jeden Ast des Entscheidungsbaums die Auftretenswahrscheinlichkeit berechnet wird, können zusammen mit den vom Betreiber spezifizierten Kosten für eine Inspektion c_I , für eine Reparatur c_R und für ein Versagen c_F die erwarteten Kosten berechnet werden. Dazu muß, vereinfacht ausgedrückt, die Wahrscheinlichkeit jedes Ereignisses mit seinen Kosten multipliziert werden, z. B. die Wahrscheinlichkeit einer Reparatur im Jahre x mit den Kosten dieser Reparatur. Da alle Kosten zum Gegenwartswert berücksichtigt werden, müssen zusätzlich alle Kosten mit einem dem Zinssatz r entsprechenden Faktor reduziert werden.

Die Gleichungen für die erwarteten Kosten, welche dem in Bild 8 gezeigten Entscheidungsbaum entsprechen, sind in [3] im Detail aufgeführt. In Bild 9 sind für das Beispiелеlement die berechneten erwarteten Kosten zum Gegenwartswert dargestellt. Die Werte des zugrunde liegenden Kostenmodells betragen $c_I = 0,001$, $c_R = 0,01$, $c_F = 1$, mit dem jährlichen Zinssatz $r = 0,05$.

6 Anwendungen

Die in diesem Artikel vorgestellten Modelle und Methoden zur risikobasierten Planung von Inspektionen wurden in den letzten 15 Jahren in zunehmendem Maße in der Praxis eingesetzt, insbesondere im Bereich von Offshore-Bauwerken mit Ermüdungsschädigungen, siehe z. B. [30] oder [31]. In diesem Bereich sind die Kosten sowohl für Versagen wie auch für die Inspektion und Reparatur von Bauteilen sehr hoch, so daß die Betreiber ein großes Interesse an einer Optimierung des Bauwerkunterhalts zeigen. In anderen Bereichen ist die Methodik bisher nur vereinzelt eingesetzt worden, nicht zuletzt wegen des großen Rechenaufwandes. Dieser Nachteil ist nun aber mit dem in den letzten fünf Jahren entwickelten generischen Ansatz behoben worden. Der Leitgedanke des generischen Ansatzes ist, die aufwendigen probabilistischen Berechnungen für generische Bauteile durchzuführen. Die Resultate aus diesen Berechnungen werden in einer Datenbank gespeichert und

können für spezifische Bauteile als Funktion der wichtigsten Einflußparameter abgerufen werden. Auf diese Weise kann die Berechnung des minimal erforderlichen Inspektionsaufwandes sowie die Optimierung desselben vollständig automatisiert werden [32]. Dies bedingt einzig, daß für die betrachtete Struktur vorgängig gewöhnliche Ermüdungsberechnungen durchgeführt wurden. Auf diese Weise kann die in diesem Artikel vorgestellte risikobasierte Inspektionsplanung in die tägliche Arbeit des für den Unterhalt zuständigen Ingenieurs integriert werden. Es ist aber zu berücksichtigen, daß auch eine automatisierte Inspektionsplanung einen sachverständigen Ingenieur erfordert, welcher die Grenzen der Berechnungen kennt und die Resultate der Inspektionen interpretieren und dementsprechend Maßnahmen beschließen kann.

7 Diskussion

Die in diesem Artikel vorgestellte Methodik bezieht sich auf identifizierte Schädigungsprozesse. Es wurde im zweiten Abschnitt aber darauf hingewiesen, daß auch das Erkennen von Schädigungsprozessen mit Unsicherheiten verbunden ist. Um zu gewährleisten, daß alle relevanten Prozesse auch erkannt werden, muß die vorliegende Methodik in eine gesamtheitliche Risikoanalyse eingebettet werden, welche eine Identifizierung aller relevanten Gefährdungsbilder sicherstellt, siehe z. B. [33].

Dieser Artikel beschäftigt sich nur mit der Planung von Inspektionen für einzelne Bauteile. Diese sind aber Teil eines Gesamtsystems und können nur bedingt individuell betrachtet werden. So sind die Kosten für eine Inspektion oft von der Anzahl inspizierter Bauteile abhängig. Des Weiteren ist das Verhalten der Bauteile aufgrund gemeinsamer Einflüsse in der Regel stochastisch voneinander abhängig. Wenn an einigen Verbindungen in der Struktur Ermüdungsschäden beobachtet werden, dann steigt die Wahrscheinlichkeit, daß solche auch an anderen Verbindungen auftreten, da z. B. die Lasten, aber auch die Verarbeitungsqualität, an diesen verschiedenen Stellen ähnlich (d. h. stochastisch abhängig) ist. Wie solche Effekte in der Planung von Inspektionen berücksichtigt werden können, ist in [34] dargestellt. Eine solche Analyse basiert auf der Planung von Inspektionen für einzelne Bauteile mit Hilfe des generischen Ansatzes, bei welchem zusätzlich der Wert einer Inspektion für die nicht-inspizierten Bauteile berechnet und miteinbezogen wird.

8 Schlußfolgerungen

Im vorliegenden Aufsatz wird die risikobasierte Planung von Inspektionen für Bauwerke anhand des Beispiels einer ermüdungsbeanspruchten Verbindung präsentiert. Es wird gezeigt, wie auf konsistente Weise die minimal erforderlichen Inspektionen bestimmt werden können, so daß die Anforderungen an die Sicherheit, das maximal akzeptierbare Risiko, erfüllt werden. Mit Hilfe des neu entwickelten effizienten generischen Ansatzes zur risikobasierten Inspektionsplanung besteht nun die Möglichkeit, diese Methodik auch für „normale“ Bauwerke anzuwenden.

Referenzen

- [1] *Raiffa, H., Schlaifer, R.*: Applied Statistical Decision Theory. Cambridge: University Press 1961.
- [2] *Benjamin, J. R., Cornell, C. A.*: Probability, statistics and decision for civil engineers. New York: McGraw-Hill 1970.
- [3] *Straub, D.*: Generic Approaches to Risk Based Inspection Planning of Steel Structures. ETH Zürich, Institut für Baustatik und Konstruktion, Diss., 2004.
- [4] *Stephens, R. I., Fatemi, A., Stephens, R. R., Fuchs, H. O.*: Metal Fatigue in Engineering. 2nd edition, John Wiley & Sons 2001.
- [5] Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten. Europäische Vornorm ENV 1993-1-1, Version April 1992.
- [6] *Palmgren, A.*: Die Lebensdauer von Kugellagern. Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure 68 (1924), H. 14, S. 339–341.
- [7] *Miner, M. A.*: Cumulative Damage in Fatigue. Journal of Applied Mechanics, ASME 12 (1945), pp. A159–A164.
- [8] *Paris, P., Erdogan, F.*: A Critical Analysis of Crack Propagation Laws. Journal of Basic Engineering 85 (1963), pp. 528–534.
- [9] *Gurney, T. R.*: An analysis of some recent fatigue crack propagation data for steels subjected to pulsating tension loading. Report 1978E, UK: The Welding Institute TWI 1978.
- [10] *Pedersen, C., Nielsen, J. A., Riber, J. P., Madsen, H. O., Krenk, S.*: Reliability Based Inspection Planning for the Tyra Field. Proc. 11th OMAE Conference Calgary, Vol. 2 (1992), pp. 255–263.
- [11] *Madsen, H. O., Krenk, S., Lind, N. C.*: Methods of Structural Safety. New Jersey: Prentice Hall 1986.
- [12] *Melchers, R. E.*: Structural Reliability Analysis and Prediction. 2nd edition. New York: John Wiley & Sons 1999.
- [13] *Faber, M. H.*: Risk and Safety in Civil Engineering. ETH Zürich, Institut für Baustatik und Konstruktion, Lecture Notes, 2004.
- [14] *Milne, I., Ainsworth, R. A., Dowling, A. R., Stewart, A. T.*: Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects. International Journal of Pressure Vessels and Piping 32 (1-4) (1988), pp. 3–104.
- [15] DuraCrete: Probabilistic Performance based Durability Design of Concrete Structures. Report Brite-EuRam Project no. 1347, 1999.
- [16] *DeWaard, C., Lotz, U., Milliams, D. E.*: Predictive Model for CO₂ Corrosion Engineering in Wet Natural Gas Pipelines. Corrosion 47 (12) (1991), pp. 976–985.
- [17] *Yang, J. N.*: Application of reliability methods to fatigue, quality assurance and maintenance. Proc. 6th ICOSSAR, Innsbruck, Vol. 1 (1994), pp. 3–20.
- [18] *Wall, M., Wedgwood, F. A.*: NDT – Value for Money. Insight 36 (10) (1994), S. 782–790.
- [19] *Straub, D.*: Probabilistic Modeling of Non-Destructive Testing of Steel Structures. Proc. 4th Int. Ph.D. Symp. in Civil Engineering, München, Vol. 2 (2002), pp. 311–320.
- [20] *Moan, T., Vårdal, O. T., Hellevig, N. C., Skjoldli, K.*: Initial Crack Depth and POD Values Inferred From In-Service Observations of Cracks in North Sea Jackets. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Trans. ASME 122 (2000), pp. 157–162.
- [21] *Wicki, R., Malioka, V., Faber, M. H.*: Condition Indicators for Inspection and Maintenance Planning. Proc. Workshop on Risk-Based Maintenance of Civil Structures, Delft 2003, pp. 62–76.
- [22] *Madsen, H. O.*: Model Updating in Reliability Theory. Proc. ICASP5, Vancouver 1987, pp. 565–577.
- [23] JCSS, the Joint Committee on Structural Safety: Probabilistic Assessment of Existing Structures. Bagnaux: RILEM Publications 2001.
- [24] *Hong, H. P.*: Reliability analysis with nondestructive inspection. Structural Safety 19 (4) (1997), pp. 383–395.
- [25] SIA 263: Stahlbau. Norm, Zürich, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein 2003.
- [26] NORSOK N-004: Design of Steel Structures. Standard N-004, Revision 1, 1998. Online verfügbar unter www.nts.no/norsok/ Aktualisierungsdatum: 02. 10. 2004.
- [27] *Faber, M. H., Engelund, S., Sørensen, J. D., Bloch, A.*: Simplified and Generic Risk Based Inspection Planning. Proc. 19th OMAE Conference, New Orleans 2000.
- [28] *Moan, T., Vårdal, O. T.*: Probabilistic assessment of fatigue reliability of existing offshore platforms. Proc. 8th ICOSSAR, Newport Beach CA 2001.
- [29] *Rackwitz, R.*: Optimization – the basis for code-making and reliability verification. Structural Safety 22 (2000), pp. 27–60.
- [30] *Faber, M. H., Sørensen, J. D., Tychsen, J., Straub, D.*: Field Implementation of RBI for Jacket Structures. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Trans. ASME 127 (3) (2005), pp. 220–226.
- [31] *Chakrabarti, P., Mukkamala, A., Abu-Odeh, I., Majumdar, B., Faber, M. H., Straub, D., De la O, J.*: An Overview of the Reassessment Studies of Fixed Offshore Platforms in the Bay of Campeche, Mexico. Proc. 24th OMAE Conference, Halkidiki, Greece 2005.
- [32] *Straub, D., Faber, M. H.*: Computational Aspects of Risk Based Inspection Planning. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering 21 (3) (2006), pp. 179–192.
- [33] *Goyet, J., Straub, D., Faber, M. H.*: Risk Based Inspection Planning for Offshore Installations. Structural Engineering International 12 (3) (2002), pp. 200–208.
- [34] *Straub, D., Faber, M. H.*: Risk Based Inspection Planning for Structural Systems. Structural Safety 27 (4) (2005), pp. 335–355.

Autoren dieses Beitrages:

Dr. Daniel Straub, Prof. Dr. Michael H. Faber, beide Institut für Baustatik und Konstruktion an der ETH Zürich, Wolfgang-Pauli-Straße 15, ETH Hönggerberg HIL, CH – 8093 Zürich