

# Inspektionsplanung in der Meerestechnik: neue Konzepte

Autor(en): **Rackwitz, Rüdiger**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **112 (1994)**

Heft 21

PDF erstellt am: **07.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-78447>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# Inspektionsplanung in der Meerestechnik

Neue Konzepte

**Die Problematik bei Zuverlässigkeitsaussagen für Meeresplattformen bei Materialermüdung wird zusammenfassend dargestellt. Daraus werden Konzepte abgeleitet für die Verwendung von aktuellen Informationen bei der kostenoptimalen Planung von Inspektionen und Reparaturmassnahmen.**

Die ältesten Meeresplattformen in der Nordsee erreichen in diesen Jahren ihre vorgesehene Nutzungsdauer von etwa

VON RÜDIGER RACKWITZ,  
MÜNCHEN

25 Jahren. Hierdurch hat sich vor einigen Jahren für meeres technische Anlagen in der Nordsee die Frage nach einer möglichen Gefährdung durch Materialermüdung gestellt, die sich in dieser Form in den anderen Gegenden der Welt mit Offshore-Anlagen noch nicht gestellt hatte. Die Plattformen in der Nordsee sind wie alle anderen Plattformen durch die extremen Wellen und viele aussergewöhnliche Ereignisse wie z.B. Blow-Out, Feuer, Explosion und Schiffsanprall gefährdet. Sie altern aber viel stärker durch die fast ständig rauen Umweltbedingungen. Im Golf von Mexiko hat schon die 100-Jahreswelle nur eine Doppelamplitude von 15 bis 20 Metern, während sie in der Nordsee rund 30 Meter betragen kann. Im Golf von Mexiko treten extreme Belastungsbedingungen nur wenige Male im Jahr auf. Dazwischen herrschen relativ ruhige Verhältnisse. In der Nordsee findet man hingegen fast das ganze Jahr über wesentlichen Seegang.

Vor allem die Stahlrahmenkonstruktionen in grösseren Wassertiefen (50 bis 300 m), bei denen schon erhebliche dynamische Wirkungen auftreten, erweisen sich als ermüdungsgefährdet. Man hat Risse mit Längen von mehreren Metern beobachtet. Auch wenn diese Risse bisher im allgemeinen nicht in den für den Bestand der Struktur wesentlichen Traggliedern der Konstruktion, sondern meist in untergeordneten Konstruktionen, z.B. für die Führung von Rohrleitungen, auftraten, wurde das Problem möglicher Materialermüdung relativ frühzeitig erkannt.

Seither sind erhebliche Forschungsanstrengungen unternommen worden, das Auftreten von Ermüdungsrissen vor-

auszusagen und danach Inspektionen und Unterhaltungsmassnahmen einzurichten. Die gesamte Analyse erfordert das Zusammenspiel von mehreren Disziplinen, d.h. der Ozeanographie, Hydrodynamik, Strukturmechanik, Materialwissenschaft, Prüftechnik und der zuverlässigkeitsorientierten Optimierung. Es scheint, dass nunmehr die wesentlichen Bausteine einer Methodik zur zuverlässigkeitsorientierten Inspektionsplanung eine Reife erfahren haben, die es aussichtsreich erscheinen lässt, die hochgradig computerisierten Verfahren in der Praxis anzuwenden. Erste Anwendungen sind bekannt. Dabei ist zu erwähnen, dass die Bemessungsvorschriften, die ursprünglich im wesentlichen auf die Verhältnisse im Golf von Mexiko zugeschnitten waren, allmählich an die härteren Bedingungen in der Nordsee angepasst werden und die Anstrengungen bei den im 5-Jahres-Turnus erfolgenden Inspektionen durch das geschärfte Bewusstsein möglicher Gefahren in den letzten Jahren verstärkt wurden.

Lebensdauervoraussagen sind mit grossen Unsicherheiten verbunden. Die Unsicherheiten rühren zum Teil aus der maritimen Umwelt her, d.h. der Wellenbelastung, den Belastungen aus Meeresströmungen, dem unvermeidlichen Bewuchs der Tragglieder unterhalb der Wasserlinie, und daher grösseren Wellenangriffsflächen, und natürlich den Belastungen beim Betrieb der Plattformen. Erhebliche Unsicherheiten entstehen aber auch in der Tragwerksanalyse, besonders wenn dynamische Wirkungen auftreten. Sie sind bedingt durch gewisse Näherungen beim Ansatz der hydrodynamischen Belastungen und durch die Unsicherheiten beim Ansatz der Steifigkeiten des Systems und der Untergrundsteifigkeiten. Bei der Berechnung der lokalen Spannungen bzw. Spannungskonzentration in den Schweissnähten der Rohrknöten können verschiedene Berechnungsansätze Unterschiede in den Spann-

Überarbeitete Fassung des Referates gehalten auf der DKMM Informationstagung «Maritime Umwelt – Mariner Umweltschutz», Berlin, 19.4.1993.

gen von weit über 100% ergeben, ohne dass man sagen könnte, dass das eine Verfahren den anderen aus Gründen der Wirklichkeitsnähe vorzuziehen wäre. Die Zeiten bis zum Anriss streuen stark, und auch die Phase fortschreitender Risse wird von vielen unsicheren Parametern bestimmt. Dabei ist nicht nur der Ansatz des richtigen Belastungskollektivs von grosser Bedeutung, sondern auch die Festlegung der entsprechenden Materialparameter. Ein statistischer Ansatz liegt nahe und wurde auch frühzeitig versucht.

Ziel einer kostenoptimalen Inspektionsplanung unter Beachtung von Zuverlässigkeitsvorgaben ist nicht nur, die Inspektionszeitpunkte (die bisherigen aus dem Schiffbau entnommenen Regeln fordern die Inspektion aller kritischen Punkte in einem Abstand von 5 Jahren), sondern auch die Inspektionsmethoden und gegebenenfalls die Art der Reparatur festzulegen. Hier kann nicht über die vielen, in diesem Zusammenhang zu untersuchenden Sonderfragen berichtet werden. Stattdessen soll ein Überblick gegeben werden, in der Hoffnung, damit den hohen technischen Stand, aber auch die Schwierigkeiten einer zuverlässigkeitsorientierten Inspektionsplanung aufzeigen zu können. Dabei möge der Leser nachsehen, wenn besonderes Augenmerk den Problemen gewidmet wird, denen sich der Verfasser in den vergangenen Jahren angenommen hat.

## Berechnung der Beanspruchungen in Meeresplattformen

Der begrenzte Raum verbietet es, eine umfassende Darstellung von Theorie und Praxis der Strukturberechnung von Meeresplattformen zu geben. Es sollen daher nur einige wichtige Schritte und Charakteristiken angedeutet werden. Ausgangspunkt jeder Berechnung von Ermüdungsbeanspruchungen ist der Seegang und gegebenenfalls eine Strömung. Der Seegang wird als Gaußscher Prozess angenommen, d.h. als Überlagerung vieler Kosinuswellen mit unterschiedlicher Amplitude und Phase, obwohl reale Wellen vor allem bei flacherem Wasser die Tendenz zu spitzeren Wellenbergen und flacheren Wel-

lentälern zeigen. Die Verteilungsfunktion der Wellenhebungen ist tatsächlich leicht rechtsschief. Die Energieverteilung der einfallenden Wellen wird in der Regel durch ein eingipfeliges theoretisch begründetes Spektrum beschrieben, z.B. durch das JONSWAP-Spektrum oder das Pierson-Moskowitz-Spektrum.

Beide Spektren gelten für sich entwickelnden oder bereits voll entwickelten Seegang. Die Parameter dieser Spektren werden für jeden Seezustand aus Seegangbeobachtungen über die signifikante Wellenhöhe und die dazugehörige Wellenperiode sowie Wellenhauptaufrichtung und gegebenenfalls Streuung der Laufrichtung abgeleitet. Die Häufigkeit bestimmter signifikanter Wellenhöhen und Perioden wird in sogenannten Scatterdiagrammen für jede Wellenhauptaufrichtung, normalerweise nur für die Oktanten der Windrose, zusammengefasst. Die Annahme eingipfeliges Spektren ist eine Näherung. Für die Ermüdungsbeanspruchungen können auch mehrgipfelige Spektren, die wesentliche Dünungsanteile oder Anteile aus sich gerade entwickelnder Windsee enthalten, massgebend sein. Insgesamt ergibt das in der Regel über 200 verschiedene Seezustände, die zu berücksichtigen sind.

Das Wellenhebungsspektrum liefert dann über eine Wellentheorie, es wird fast ausschliesslich die sogenannte lineare Airysche Wellentheorie verwendet, die Spektren der Wassergeschwindigkeiten und -beschleunigungen. Diese gehen in die sogenannte Formel von Morison für die eigentlichen Belastungen ein, die neben einem zähigkeitsbedingten Widerstandsterm auch einen Term für die beschleunigten Wassermassen beinhaltet. Die Bedingung, dass die Wasserpartikelgeschwindigkeiten und die Widerstandskräfte gleichgerichtet sein müssen, macht die Morisonformel nicht linear. Sie muss geeignet linearisiert werden. Alle Linearisierungsansätze enthalten bei dynamisch reagierenden Tragwerken die Tragwerksgeschwindigkeiten, die erst Ziel der Berechnung sind. Daher ist eine iterative, allerdings in der Regel schnell konvergierende Berechnung notwendig. Für extreme Belastungen sind alle gängigen Linearisierungsschemata unkonservativ. Bei dynamisch reagierenden Strukturen gibt es auch wesentliche hydrodynamische Dämpfung. Die Lasten auf die einzelnen Rahmenstäbe, vor allem wenn sie relativ eng zueinander stehen, beeinflussen sich gegenseitig durch Verwirbelungen, Abstrahlung und durch Ausbildung lokaler Wirbelstrassen. Eine anerkannte Theorie fehlt, und Versuche sind schwierig und

praktisch nicht von einer Konfiguration auf eine andere zu übertragen. Zusätzliche und genauere Ausführungen mag der Leser z.B. in [3] nachlesen.

Die dynamische Berechnung selbst kann sehr aufwendig sein, da reale Strukturen bis zu 20 000 Freiheitsgrade haben können. Dabei ist wichtig, dass die quasi-statischen Anteile der Belastungen richtig erfasst werden [7]. Für eine grosse Struktur ist es oft notwendig, eine ganze Reihe von Eigenwerten und Eigenvektoren zu berechnen. Im übrigen gelten aber die klassischen Verfahren der Theorie der Zufallsschwingungen, die wegen der quasi-stationären Seezustände von mehreren Stunden Dauer am besten im Frequenzbereich formuliert werden. Ergebnis der umfänglichen Berechnungen sind dann z.B. die spektralen Momente der Schnittgrössen in den Knotenschnitten.

Für alle gefährdeten Rahmenknoten ist dann eine wiederum umfängliche Berechnung der sogenannten «Hot spot»-Spannungen in den Schweissnähten infolge der Knotenrandschnittgrössen erforderlich, um die Kerbwirkungen in den als Biegeschalen wirkenden Rahmenknoten richtig zu erfassen. Formeln, die aus Parameterstudien bestimmter Knotengeometrien in der Literatur verschiedentlich zusammengestellt wurden, sind mit grosser Vorsicht einzusetzen. Die spektralen Momente dieser «Hot spot»-Spannungen dienen schliesslich als Eingang in die eigentliche Ermüdungsberechnung. Sie müssen für jeden Seezustand berechnet werden, da sich die Perioden und die Amplituden sowie die Wellenrichtungen wesentlich von Seezustand zu Seezustand verändern.

Der letzte Schritt in der Strukturberechnung ist die Ableitung des schädigungsgleichen Einstufenkollektivs. Hierfür ist inzwischen die Rainflow-Methode Standard, für die es aber leider keine einfachen analytischen Lösungen gibt. Strenggenommen muss hierfür mit Hilfe der spektralen Momente über die Seezustände hinweg eine Anzahl Spannungsverläufe simuliert werden, die dann auszuzählen sind. Das ist sehr aufwendig. Es bieten sich aber einige Näherungsverfahren an, deren Güte z.B. in [1] verglichen wurde. Diese Berechnungen müssen nur einmal durchgeführt werden. Es hat sich gezeigt, dass der damit verbundene beträchtliche Aufwand für zuverlässige Lebensdauer-Voraussagen auch notwendig ist. Es ist klar, dass in der praktischen Anwendung dann ein Problem der Datenablage auftritt, da idealerweise die spektralen Momente für alle Seezustände und alle potentiell gefährde-

ten Rahmenknoten abgelegt werden müssen. Verschiedentlich wird daher auch mit der auf die vorliegende Aufgabe in der Schiffstechnik erstmals angewandten Methode der Antwortflächen gearbeitet. Hierbei werden die spektralen Momente, z.B. in Form von Hermite-Polynomen mit signifikanter Wellenhöhe, -periode und -hauptaufrichtung als Parameter, beschrieben [13]. Die Parameter werden durch eine geeignete mehrdimensionale Verteilungsfunktion erfasst.

## Versagenskriterien

Als Versagenskriterien können verschiedene Grenzzustände formuliert werden. In der klassischen Ermüdungsanalyse ist dies der sogenannte Anriss, d.h. derjenige kleine Riss, bei dem Ermüdungsversuche vielfach bereits abgebrochen werden. Ergebnis der Versuche ist die S-N-Kurve oder das Wöhlerdiagramm. Der Bereich grosser Lastspielzahlen ( $>10^6$ ) muss extrapoliert werden. Er spielt wegen der sehr grossen Lastspielzahlen ( $10^6$  bis  $10^8$ ) in der Meerestechnik eine bedeutende Rolle. Es ist aber immer noch ungeklärt, wann eine Dauerfestigkeit, und wenn, in welcher Höhe, angesetzt werden darf. Als Kompromiss setzt sich immer mehr eine Wöhlerkurve mit zwei verschiedenen Neigungen bei log-log-Auftragung durch. Verschiedene Vorschriften enthalten solche Kurven. Obwohl sie wenigstens zum Teil auf den gleichen Versuchen beruhen, unterscheiden sie sich doch so stark, dass mit ihnen Lebensdauern berechnet werden können, die sich um bis zu einer Grössenordnung unterscheiden. Das ist in der Praxis beunruhigend, und man kann nur fordern, dass diese Unterschiede durch weitere Versuche und eine bessere Theorie verringert werden.

Für die Berechnung der Zeit bis zum Anriss werden Wöhlerkurven zusammen mit einem entsprechend umgerechneten, schädigungsgleichen Einstufenkollektiv verwendet. Die in Vorschriften und Empfehlungen enthaltenen Wöhlerkurven entsprechen ungefähr der 10% Fraktile. Für probabilistische Betrachtungen benötigt man jedoch die gesamte Verteilungsfunktion. Die Diskussion, welches Verteilungsgesetz diese Zeiten haben, dauert noch an. Die Frage nach der Existenz der Dauerfestigkeit wurde bereits angesprochen. Bei Verwendung von Wöhlerkurven fehlt im übrigen immer noch ein brauchbarer Ansatz, die Änderung der Streuung der Lebensdauern mit der mittleren Lebensdauer wirklichkeitsnah zu erfassen.

Im einfachsten Fall einer genaueren bruchmechanischen Betrachtung ist der Versagensfall eingetreten, wenn die Rissgrösse einen bestimmten Wert, z.B. die Wanddicke, überschreitet. Die Rissfortschrittsberechnung muss dabei in der Regel von einem zweidimensionalen Riss ausgehen, und es ist notwendig, die besonderen, in den Schweissnähten der Rohrknoten geltenden Geometriefaktoren so genau wie möglich zu berücksichtigen.

Wesentlich schwieriger ist der Fall zu behandeln, in dem mit Rissinstabilität zu rechnen ist. Da man bei Betriebsbelastung nicht genau sagen kann, bei welcher Spannung der Riss instabil wird, muss man ein instationäres Schwellenwert-Überschreitungsproblem lösen, d.h. man muss die Wahrscheinlichkeit berechnen, dass z.B. der risslängen- und spannungsabhängige Spannungsintensitätsfaktor zum erstmaligen Bruchzeitintervall überschreitet. Gegebenenfalls kann die günstige Wirkung plastischer Zonen an der Risspitze berücksichtigt werden. Bei Rohrkonstruktionen ist Rissinstabilität allerdings selten, da ausserhalb der starken Spannungskonzentrationen in Schweissnähten im Bereich der Rohrknoten die Voraussetzungen für Rissinstabilität nicht mehr gegeben sind. Unter Umständen ist in den Rissfortschrittsberechnungen auch das

Phänomen des «Corrosion fatigue» zu erfassen.

Im allgemeinen nimmt die Initiierungszeit den grössten Teil der Zeit bis zum Bruch ein. Daran schliesst sich die Rissfortschrittszeit an. Wenn aber die Defekte schon von Anfang an gross genug sind, erfolgt die Schädigung der Struktur sofort durch Risswachstum. Berechnungen und Beobachtungen stimmen darin überein, dass Risse bei entsprechendem Spannungsangebot in relativ kurzer Zeit (wenige Monate bis 5 Jahre) bis auf kritische Grösse anwachsen können. Tatsächlich kann man an Land nur Fehlstellen von einer Grösse ab etwa 2 mm zuverlässig entdecken und korrigieren. Das ist aber genau die Grösse, ab der bei entsprechend hohen Spannungskonzentrationen auch zügiges Risswachstum erfolgt. Bei der Grösse solcher Strukturen muss man also mit vielen Rissen bereits kurz nach der Aufstellung der Struktur rechnen. Das wird auch beobachtet, wengleich sich herausstellt, dass viele dieser Risse niemals wachsen.

Damit kommt der Unterwasserinspektion eine zentrale Bedeutung für den Erhalt der Struktur zu, und die wichtigste Aufgabe von rechnerischen Lebensdauer-Vorhersagen ist eine Ordnung der kritischen Stellen, die vorrangig zu untersuchen sind, aufzustellen. Dabei muss man sich im klaren sein, dass die

Rechnung bestenfalls eine relative Ordnung ergeben kann und man froh sein muss, wenn Lebensdauern grössenordnungsmässig richtig eingeschätzt werden. Beispielhaft sind für die in Bild 1 dargestellte, rund 110 m hohe Struktur rechnerische mittlere Anrissdauern den beobachteten Risslängen gegenübergestellt. Die Risse in den Knoten 108 und 308 sind keine Ermüdungsrisse. Alle beobachteten Risse wurden z.T. mehrfach durch Abschleifen repariert.

**Inspektionen und Informationsverbesserung mit Hilfe des Bayesschen Satzes**

Bild 2 zeigt typische Kurven für die Wahrscheinlichkeit der Entdeckung von Rissen gegebener Grösse (probability of detection = POD). Während die beiden erstgenannten Verfahren die relativ zuverlässige Entdeckung von kleinen Rissen erlauben, sind optische Verfahren ziemlich unzuverlässig. Das liegt an dem unvermeidlichen Bewuchs und den erschwerten Arbeitsbedingungen unter Wasser. Andererseits ist der Aufwand für die beiden anderen Inspektionsverfahren wesentlich höher. Sie sind in der Summe auch nur dann wirklich zuverlässiger, wenn man bereits präzise Vorstellungen über die Lage potentieller Risse hat und dort gezielt mes-

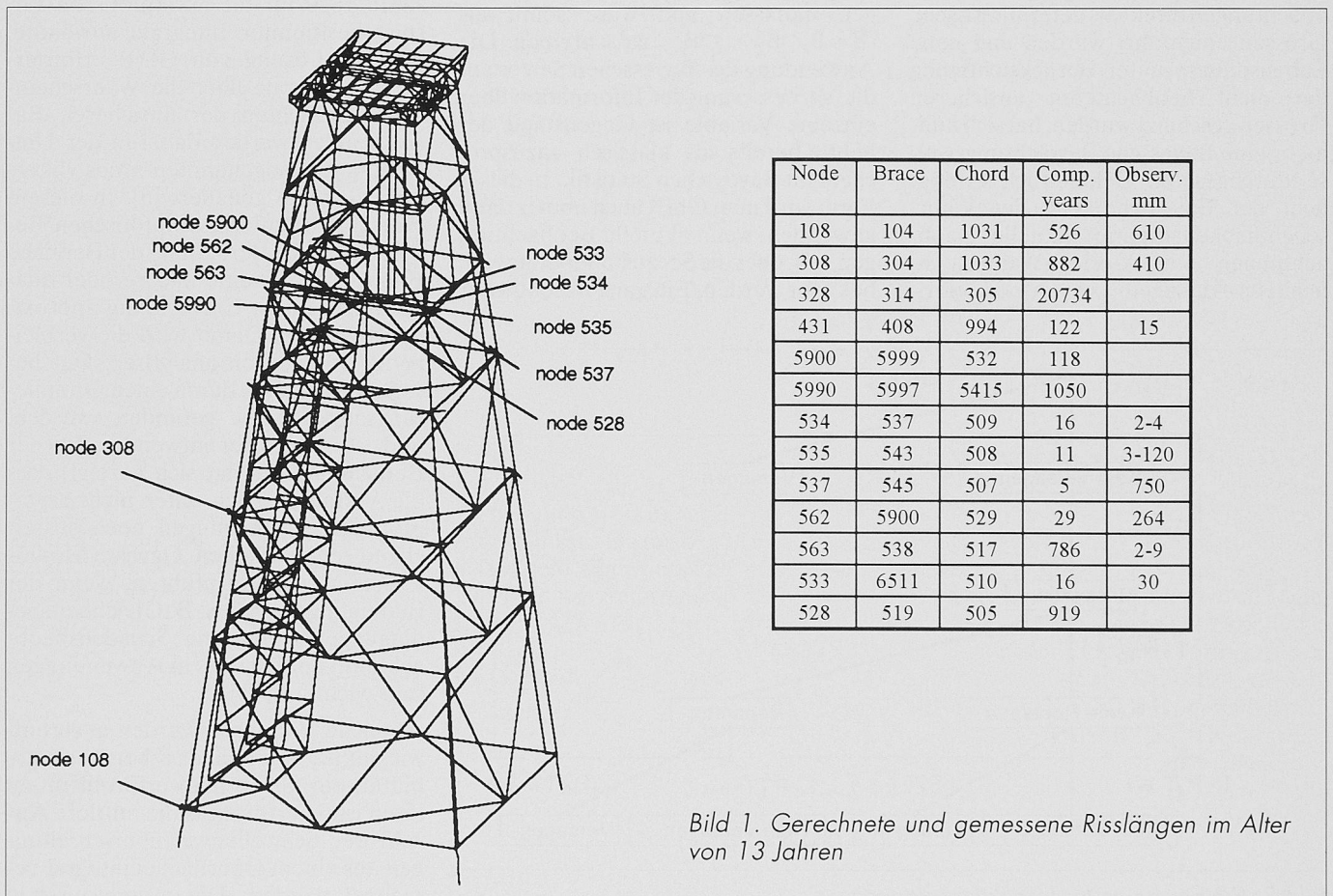


Bild 1. Gerechnete und gemessene Risslängen im Alter von 13 Jahren

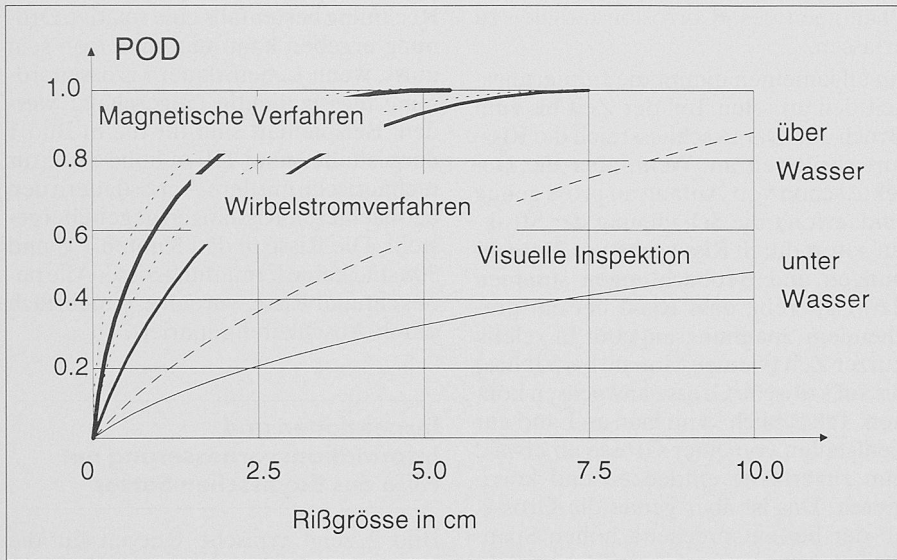


Bild 2. Entdeckungswahrscheinlichkeit von Rissen

sen kann. Ergebnis einer Inspektion an einem bestimmten Ort ist dann entweder die Aussage, dass kein Riss beobachtet wurde, dass der Riss eine bestimmte Grösse hat oder dass er kleiner oder grösser als ein bestimmter Wert ist. Bei diesen Aussagen sind natürlich immer Messfehler zu berücksichtigen. Man muss mit Variationskoeffizienten von 15% und mehr rechnen.

Von zentraler Bedeutung ist dann, ob und wie aktuelle Beobachtungen in die Berechnungen eingeführt werden. Während noch vor einigen Jahren Beobachtungen direkt als deterministische Grössen eingeführt wurden und neue Lebensdauern unter Berücksichtigung der nicht beobachteten unsicheren Grössen geschätzt wurden, hat sich nunmehr eine Bayessche Betrachtungsweise durchgesetzt. Bekanntlich ermöglicht der Bayessche Satz der Wahrscheinlichkeitstheorie aktuelle Beobachtungen mit A-priori-Wahrscheinlichkeits-Aussagen zu A-posteriori-

Aussagen zu verknüpfen. Man spricht von «updating». Die zentrale Formel lautet:

$$P(F|B) = \frac{P(F \cap B)}{P(B)} \quad (1)$$

worin  $P(F|B)$  eine bedingte Wahrscheinlichkeit des Versagens  $F$  unter Bedingung des Beobachtungskomplexes  $B$  ist. Sowohl  $F$  als auch  $B$  können ihrerseits Kombinationen von verschiedenen Ereignissen sein. Zum Beispiel kann  $B$  eine Anzahl von Beobachtungen umfassen und wäre somit als  $B = B_1 \cap B_2 \cap \dots \cap B_n$  zu schreiben. Die Anwendung des Bayesschen Satzes auf die Verbesserung der Information über einzelne Variable ist Gegenstand der heute bereits als klassisch anzusprechenden Bayesschen Statistik. In dieser Form wird man Gl.(1) auch immer dann anwenden, wenn aktuelle Beobachtungen, z.B. über die Seezustandparameter, bekannt werden. Ein ganz wesentlicher

Fortschritt wurde aber erreicht, als 1985 wohl erstmals durch Madsen und Rackwitz/Schrupp, letztere mit Anwendungen auf die Zuverlässigkeit bei Qualitätskontrolle und Probelastungen, der Bayessche Satz auf komplexe Ereignisse angewandt wurde [8, 10]. Ein solches Ereignis kann beispielsweise jenes sein, dass eine Komponente des Systems zu einem bestimmten Zeitpunkt einen Schaden bestimmter Grösse (z.B. Risslänge) hat, oder auch das noch viel komplexere Ereignis, dass an  $n$  Stellen des Tragwerks  $n$  verschiedene Schadensbeobachtungen (mit oder ohne Messfehler) vorliegen und dass das Tragwerk noch besteht. Dann ist natürlich zu fragen, wie diese von vielen Basisvariablen abhängigen Ereigniswahrscheinlichkeiten berechnet werden können.

Hier kann nicht über die Details der Berechnung dieser Wahrscheinlichkeiten gesprochen werden. Es sei nur erwähnt, dass ganz erhebliche Entwicklungsarbeit betrieben werden musste, um effiziente Berechnungen der A-posteriori Versagenswahrscheinlichkeit  $P(F|B)$  zu ermöglichen. Als weitaus effizienteste Methode erwiesen sich Rechenalgorithmen, die auf sogenannten FORM/SORM-Konzepten beruhen (FORM = First Order Reliability Method, SORM = Second Order Reliability Method). Bekanntlich leiten sich diese Verfahren aus Ideen her, die Laplace bereits im Jahre 1820 für die asymptotische Lösung bestimmter Integrale anwandte. Die zur Lösung von Gl.(1) erforderlichen Integrale über die Wahrscheinlichkeits-Dichten der unsicheren Basisvariablen werden dabei in der Umgebung des sogenannten «most likely failure point» genähert [6]. In diesem Punkt kann unter asymptotischen Bedingungen die Berandung der Bereiche  $F$  und  $B$  durch eine lineare oder quadratische Taylor-Entwicklung approximiert werden. Damit wird die verbleibende Integration analytisch. Der besagte Punkt muss durch einen Optimierungsalgorithmus gefunden werden, und das ist auch der aufwendige Teil der Berechnung. Es hat sich gezeigt, dass die Verfahren auch unter nicht asymptotischen Bedingungen noch ausreichend genau arbeiten. Gewisse Modifikationen sind einzuführen, wenn der Bedingungskomplex  $B$  Gleichheitsbedingungen (z.B. eine Schadensbeobachtung) enthält, was in Anwendungen sehr wichtig ist [11].

Ähnliche Verfahren wurden auch entwickelt für den Fall, dass bei Rissinstabilität ein Schwellenwertproblem zu lösen ist. Hierfür muss die mittlere Anzahl der Schwellenwertüberschreitungen aus einem Oberflächenintegral berechnet werden. Die asymptotischen

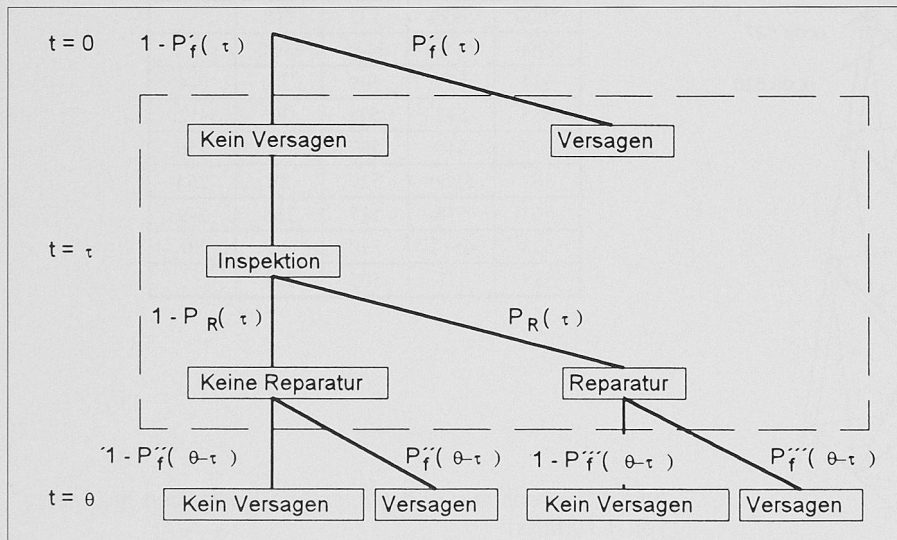


Bild 3. Ereignisbaum für Inspektionsplanung

Konzepte für die Berechnung der oben erwähnten Volumenintegrale erweisen sich auch hier als hilfreich [9,2]. Eine zusätzliche Schwierigkeit ergibt sich aus der Tatsache, dass der Folge der Seezustände der Seegangs- bzw. Spannungsprozess überlagert ist und dass darüber hinaus noch die unsicheren, nicht oder deterministisch von der Zeit abhängigen Materialparameter berücksichtigt werden müssen [13]. Insgesamt mag festgestellt werden, dass die rechnerischen Aufgaben heute bewältigt werden können. Und es sei angemerkt, dass die gleichen Methoden natürlich auch für jede Standsicherheitsanalyse für Objekte an Land vor und nach Beobachtungen des aktuellen Zustandes eingesetzt werden können.

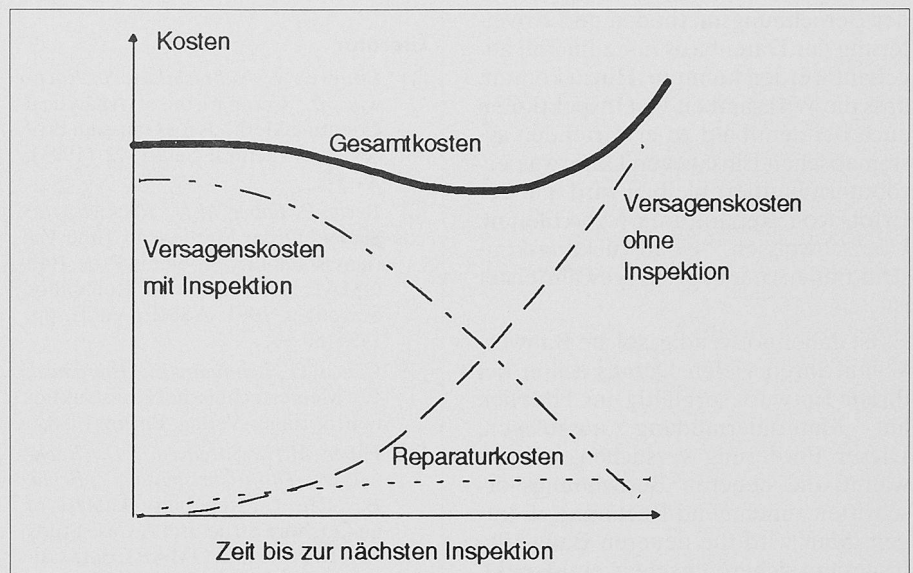


Bild 4. Erwartete Kosten über der Zeit zur nächsten Inspektion

### Inspektionsplanung

Bild 3 veranschaulicht zunächst die Ereignisfolge bei Inspektionen. Zum Zeitpunkt  $t = 0$  sei das Tragwerk in Dienst gestellt oder habe gerade eine Inspektion erfahren. Zum Zeitpunkt  $t = \tau$  werde inspiziert und zum Zeitpunkt  $t = \Theta$  werde wieder inspiziert oder sei die vorgesehene Nutzungsdauer des Tragwerks erreicht. Dann können jeweils die in Bild 3 aufgeführten Ereignisse eintreten. Die zugehörigen Wahrscheinlichkeiten sind ebenfalls angegeben. Diese werden unter Verwendung des jeweils aktuellen Informationsstandes wie oben angedeutet berechnet. Zusätzliche Angaben über die entscheidungstheoretische Grundlage und zur Methodik der Berechnungen für die Versagenswahrscheinlichkeit finden sich in [5].

Für die kostenoptimale Planung von Inspektionen und Unterhaltungsmassnahmen ist es schliesslich noch notwendig, Kosten einzuführen. Bei den sehr grossen Kosten für Inspektionen und gegebenenfalls Reparaturen ist es nämlich schlicht unrealistisch, Inspektionsplanungen nur aufgrund von Zuverlässigkeitsvorgaben auszuführen. Kosten sind für den Entwurf, die Inspektionen, Reparaturen und natürlich für den gefürchteten Versagensfall anzunehmen. Dabei genügt es, dass die verschiedenen Kostenteile relativ zueinander im richtigen Verhältnis stehen. Entscheidungskriterium, z.B. für den optimalen Inspektionszeitpunkt, sind die erwarteten Gesamtkosten, also die Summe der verzinsten oder nicht verzinsten Kosten, jeweils multipliziert mit ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit. Die Gesamtkosten zeigen ein charakteristisches Aussehen (vergl. Bild 4).

Zum Zeitpunkt  $t = 0$  seien keine feststellbaren Schädigungen vorhanden. Die Gesamtkosten wachsen zunächst. Das liegt daran, dass die Versagenswahrscheinlichkeit, d.h. die Wahrscheinlichkeit eines Versagens vor der nächsten Inspektion, zunächst nur langsam mit der Zeit wächst und Inspektionen im Frühstadium noch nicht sehr informativ sind, da sich entweder noch gar kein Riss entwickelt hat oder aber mit relativ grosser Wahrscheinlichkeit noch übersehen wird. In diesem Stadium verursachen Inspektionen nur Kosten. Inspektionen zu einem späteren Zeitpunkt sind informativer.

Ist der dann beobachtete Riss wesentlich kleiner als der erwartete, so verringert sich durch das «updating» die Versagenswahrscheinlichkeit für die Zukunft spürbar. Ist der Riss wesentlich grösser als erwartet oder sogar schon nahe an seinem kritischen Wert, erfolgt Reparatur. Hierdurch erhöhen sich die Kosten. Damit fällt die Versagenswahrscheinlichkeit wieder auf einen sehr kleinen Wert ab. Insgesamt fallen die Gesamtkosten nach einer gewissen Zeit wieder und erreichen bei weiterer Verzögerung der Inspektion ein Minimum, um danach wegen nunmehr schnell anwachsender Versagenswahrscheinlichkeit und wachsenden, erwarteten Reparaturkosten stark anzusteigen. Der Zeitpunkt minimaler Gesamtkosten ist der optimale Inspektionszeitpunkt. Meist ist das Kostenoptimum relativ flach. Das ist in praktischen Anwendungen günstig, weil eine solche Kostenanalyse für eine ganze Reihe von kritischen Punkten, an denen jeweils unterschiedliche Verhältnisse herrschen, durchgeführt werden muss. Aus der Gesamtheit der Kostenkurven aller kritischen Stellen ist dann die Inspektionskampagne zu entwickeln. Es ist

selbstverständlich, dass zusätzliche Randbedingungen wie Reparierbarkeit, zulässige Versagensrate, Zeitfenster (Inspektionen und Reparaturen können in der Nordsee nur bei ruhigem Wetter im Sommer durchgeführt werden) zu beachten sind.

Der Einfachheit halber wurde vorstehend nur der Fall einer einzigen zukünftigen Inspektion betrachtet. Es ist aber auch möglich, die gesamten für den beabsichtigten Nutzungszeitraum notwendigen Inspektionen zu planen; allerdings mit einem erheblich grösseren rechnerischen Aufwand. In praktischen Anwendungen wird man zusätzlich die Inspektions- und Reparaturmethoden zu optimieren versuchen. In [4] finden sich einige nach dem angegebenen Schema durchgerechnete Beispiele.

### Allgemeine Folgerungen

Inzwischen ist die Entwicklung von computerisierten Rechenhilfsmitteln vielerorts schon relativ weit fortgeschritten. Mit ihrem Einsatz in der Praxis der Inspektionsplanung ist demnächst zu rechnen. Sie werden wohl im Laufe der Zeit die gegenwärtig eingesetzten, wesentlich einfacheren und grösseren Methoden ersetzen. Es ist dabei kaum zu erwarten, dass die Inspektions- und Unterhaltungskosten von Bauwerken im Meer spürbar geringer werden. Die neuen Methoden werden aber erlauben, die vorhandenen Mittel effizienter einzusetzen. Die Erfahrungen bei der Entwicklung und Anwendung dieser Methoden zeigen ganz deutlich, dass Voraussagen der Rissentstehung und Rissentwicklung vor oder nach einem oder mehreren «updates» mit grossen Streuungen verbunden sind, die auch bei weiterer Zuschärfung

der Berechnungsmethoden und Erweiterung der Datenbasis nur zum Teil abgebaut werden könnten. Hinzu kommt, dass die Wirksamkeit von Inspektionen auch bei dem bald zu erwartenden systematischen Einsatz von Unterwasserrobotern limitiert bleiben wird und der Erfolg von Reparaturen (Abschleifen, Überschweissen, Überbrückungskonstruktionen) nur begrenzt gewährleistet ist.

Es ist daher notwendig, solche Bauwerke mit ihren vielen Details schon bei ihrem Entwurf sorgfältig im Hinblick auf Materialermüdung auszulegen. Dieser Forderung versuchen, wie erwähnt, die neueren Berechnungsvorschriften zunehmend Rechnung zu tragen. Man wird die neueren Bauwerke insgesamt sicherer machen, ein Aspekt, der bei dem hohen Schadenspotential dieser Anlagen bedeutend sein sollte. Aus der Tatsache, dass Risse, wenn sie auftreten, relativ schnell wachsen können und Inspektionen nur im Sommer, und dann nicht immer zuverlässig, ausgeführt werden können, folgt weiter, dass wenigstens die Haupttragwerke von Meeresplattformen redundant ausgelegt werden sollten, und zwar viel bewusster, als dies heute geschieht.

Adresse des Verfassers: Prof. Dr.-Ing. habil. R. Rackwitz, Technische Universität München, Institut für Tragwerksbau, Arcisstrasse 21, D-80290 München.

#### Literatur

- [1] Bouyssy, V., Naboishikov, S., Rackwitz, R.: Comparison of Analytical Counting Methods for Gaussian Processes. *Structural Safety* 12 (1993), 35–57.
- [2] Bryla, P., Faber, M.H., Rackwitz, R.: Second Order Methods in Time Variant Reliability Problems. Proc. 10th OMAE '91 Safety and Reliability, Stavanger, 1991. ASME, Vol. II, pp. 143–150.
- [3] Clauss, G., Lehmann, E., Østergaard, C.: Meerestechnische Konstruktionen. Springer-Verlag, Berlin, 1988.
- [4] Faber, M.H., Sørensen, J.D., Rackwitz, R., Thoft-Christensen, P., Bryla, P., Lebas, G.: Reliability Analysis of an Offshore Structure: A Case Study – I + II. Proc. 11th OMAE Conf., Calgary, June 1992, Vol. II. ASME, 1992, pp. 449–455, 457–463.
- [5] Fujita, M., Schall, G., Rackwitz, R.: Adaptive Reliability Based Inspection Strategies for Structures Subject to Fatigue. Proc. 5th ICOSSAR '89, (A.H.-S. Ang, et al. ed.), San Francisco, Aug. 1989, Vol. II, pp. 1619–1626.
- [6] Hohenbichler, M., Gollwitzer, S., Kruse, W., Rackwitz, R.: New Light on First- and Second-order Reliability Methods. *Structural Safety* 4, pp. 267–284, 1987.
- [7] Karadeniz, H.: Advanced Stochastic Analysis Program for Offshore Structures. TU Delft, Faculty of Civil Engineering, 1989.
- [8] Madsen, H.O.: Random Fatigue Growth and Inspection. Proc. ICOSAR 1985, Kobe/Japan, 1985, I, pp. 475–484.
- [9] Plantec, J.-Y., Rackwitz, R.: Structural Reliability under Non-Stationary Gaussian Vector Process Loads. Berichte zur Zuverlässigkeitstheorie der Bauwerke. Technische Universität München, H.85, 1989.
- [10] Rackwitz, R., Schrupp, K.: Quality Control, Proof Testing and Structural Reliability. *Structural Safety* 2, 1985, pp. 239–244.
- [11] Schall, G., Gollwitzer, S., Rackwitz, R.: Integration of Multinormal Densities on Surfaces. 2nd IFIP WG-7.5 Working Conf. on Reliability and Optimization of Structural Systems, London, September, 26–28, 1988, pp. 235–248.
- [12] Schall, G., Faber, M., Rackwitz, R.: The Ergodicity Assumption for Sea States in the Reliability Assessment of Offshore Structures. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Transact. ASME, 1991, Vol. 113, No. 3, pp. 241–246.
- [13] Schall, G., Scharrer, M., Østergaard, C., Rackwitz, R.: Fatigue Reliability Investigation for Marine Structures Using a Response Surface Method. Proc. 10th OMAE-Conf., Stavanger, June 23–28, 1991, Vol. II, ASME, 1991, pp. 247–254.

## Nachhaltige Entwicklung und Raumplanung

**Nachhaltige Raumplanung bedeutet, die beiden Ansätze, den sozio-ökonomischen der räumlich funktionalen Arbeitsteilung und den ökologisch räumlich orientierten Systemansatz, im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung des Lebensraumes aufeinander abzustimmen. Dabei sind noch viele offene Fragen zu klären. Es ist abzusehen, dass die Planung der Zukunft keine flächen- und nutzungsorientierte Planung, sondern vielmehr eine räumlich funktionale sein wird.**

### Der Lebensraum des Menschen und die Grenzen des Wachstums

Der Lebensraum des Menschen lässt sich umschreiben durch seine Elemente: Landschaft (Siedlungs- und Nicht-

VON WILLY A. SCHMID, ZÜRICH

Siedlungsgebiet), Wirtschaft, Kultur, Staatsgebiet, politisch-administrative

Organisation usw. [6]. Der Lebensraum des Menschen ist somit zugleich Wohn- und Arbeitsraum, Erholungsraum, Wirtschaftsraum, ökologischer Raum, Verkehrsraum usw.. Damit kommt zum Ausdruck, dass der Lebensraum des Menschen nicht einfach als der Raum in seiner physischen Ausprägung zu verstehen ist, sondern in bezug zu den vielfältigen menschlichen Tätigkeiten zu setzen ist. Der Mensch steht in einer Wechselbeziehung zum Raum.

Die moderne Funktionsgesellschaft zeichnet sich durch hochgradige Arbeitsteilung und eine möglichst ausgewogene räumliche Zuordnung der Daseinsgrundfunktionen im Hinblick auf die gesellschaftliche Gesamtleistung aus (Bild 1).

Wie aus Bild 1 hervorgeht, sind diese Daseinsgrundfunktionen eng miteinander verknüpft, wobei es zweckmässig ist, das Wohnen im Mittelpunkt des Ordnungsschemas zu sehen, während die Funktionen Arbeiten, Bilden, Ver- und Entsorgen, Erholen sich kreisförmig um diesen Mittelpunkt anordnen lassen. Die Daseinsgrundfunktionen Verkehr und Kommunikation ermöglichen erst die notwendige Verknüpfung der genannten Daseinsgrundfunktionen.

Die Effizienz der modernen Gesellschaft beruht wesentlich auf der räumlich funktionalen Arbeitsteilung, wie sie aus den Daseinsgrundfunktionen her-