

# Prescrizioni e controlli – Elementi fondamentali per la vita utile delle opere strutturali

Konrad Bergmeister

## 1. Invecchiamento e vita utile

La vita utile descrive il lasso di tempo che si estende dall'esecuzione dell'opera alla fine della funzionalità dell'opera stessa. Una struttura è funzionale finché sono garantiti, con una certa sicurezza, gli stati limite in termini di stabilità, funzionalità d'uso e durabilità. L'emergente problematica della valutazione della sicurezza viene formulata negli Eurocodici mediante l'introduzione di valori ridotti per il coefficiente di sicurezza  $\beta$ . La problematica consiste nel trasferire i rapporti reali in un modello per la determinazione della vita utile e, quindi, per il calcolo di un coefficiente di sicurezza  $\beta$ . È facilmente immaginabile che lo sviluppo del coefficiente di sicurezza  $\beta$  come pure la durata di utilizzo teorica dipendano in modo decisivo dal mantenimento e da ispezioni eseguite a intervalli regolari e a regola d'arte. L'ispezione visiva è una prima valutazione di stato prevalentemente di tipo qualitativo e soggettivo, dipendente dall'esperienza dell'ingegnere collaudatore.

Opere in calcestruzzo esistono da oltre 120 anni. Le prime normative risalgono a 100 anni fa. Nella valutazione di opere strutturali storiche è importante acquisire dimestichezza con le normative, le prassi e gli usi di allora. Le denominazioni dei materiali e i processi di collaudo di un tempo non sono immediatamente trasferibili a oggi.

Pertanto occorre conoscere innanzitutto le condizioni del periodo in questione al fine di ottenere una base di partenza realistica. Ogni opera possiede una propria storia evolutiva. Nel caso dei ponti, per esempio, può essere utile prendere visione dei libri sull'argomento dai quali si possono evincere informazioni riguardanti eventi particolari (tra cui dati relativi a trasporti pesanti con autorizzazione speciale) che, in quanto situazioni estreme di sollecitazione, possono essere rilevanti per lo sviluppo del degrado.

L'importante è che venga valutato lo stato di sicurezza dell'opera all'inizio di una possibile vita utile residua. In presenza di scarse riserve di affidabilità si è vicini o già oltre la fine della durata di uso residua. In presenza di riserve maggiori, invece, si pone la questione di quale sia ancora la possibile vita utile residua, che eventualmente può essere anche prolungata mediante idonei interventi di manutenzione e risanamento.

Le resistenze  $R$  di un'opera devono essere maggiori degli effetti  $S$  prodotti sull'opera stessa, con un certo grado di "sicurezza" e fino alla fine della vita utile prevista  $t_d$ .

Nell'ipotesi normale, le resistenze diminuiscono generalmente con l'avanzare del tempo di utilizzo. Il calcestruzzo, in giovane età, può maturare ancora dopo 28 giorni (fino a 2-4 mesi).

Gli effetti possono però aumentare con il tempo di utilizzo. Ciò lo si può constatare, per esempio, nel caso di carichi mobili in transito su ponti stradali; la frequenza di trasporti pesanti è infatti aumentata negli ultimi anni o decenni. Anche per quanto riguarda i carichi da vento si osserva una frequenza in aumento di tempeste estreme. Si possono riportare anche altri esempi dell'aumento della frequenza e dell'intensità di carichi (piena, carichi da neve, ecc.).

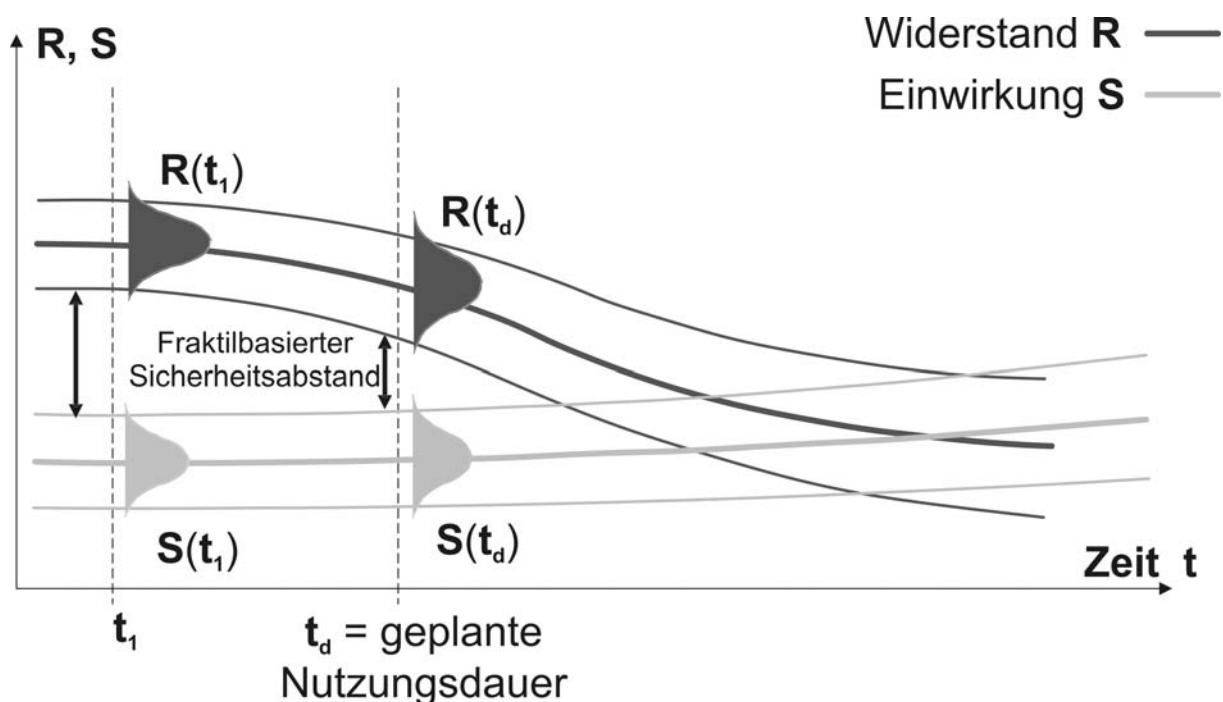


Figura 1: sicurezza durante la vita utile  $t_d$

$R$  ed  $S$  sono grandezze incerte, in continua mutazione e variabili, la cui variabilità iniziale si estende in generale con il tempo. Mediante degrado sul lato  $R$  nonché risultati  $S$  crescenti o più frequenti e determinanti sull'altro lato, le distribuzioni di  $R$  ed  $S$  si avvicinano con il tempo e la sicurezza o affidabilità che risulta da calcoli probabilistici diminuisce.

L'obiettivo deve essere tale per cui all'inizio della vita utile le resistenze dell'opera sono dotate in via preventiva di tali riserve da far sì che la vita utile  $t_d$  possa essere realizzata in modo sufficientemente sicuro senza ulteriori interventi di migioria.

In alternativa si può iniziare con un numero inferiore di riserve preventive, ma occorre provvedere successivamente a misure di risanamento, eventualmente in modo ripetuto a determinati intervalli di tempo, in modo tale che la sicurezza non scenda

sotto un valore minimo ancora accettabile prima dello scadere della vita utile prevista.

Per garantire la vita utile  $t_d$  un controllo di qualità completo è imprescindibile, il quale sia orientato non solo al progetto, al calcolo, alla costruzione e alla realizzazione in cantiere, ma che comprenda anche controlli successivi ed eventuali interventi di manutenzione, in base al concetto di dimensionamento.

## **2. Analisi di stato**

Il punto di partenza di ogni decisione deve pertanto essere rappresentato da una profonda analisi di stato e valutazione di un ponte [1]. Al proposito, il presupposto principale è ancor sempre costituito dalla ispezione visiva e dalla rilevazione il più possibile precisa dello stato di stabilità e comportamento. L'evoluzione continua nello sviluppo dei componenti per le tecnologie di comunicazione, elaborazione dati e misurazione basate sull'informatica e sull'uso di sensori ha condotto allo sviluppo di una serie di concetti e sistemi per il controllo non distruttivo dei materiali e per il monitoraggio dell'opera strutturale [2, 3, 4]. I sistemi parzialmente automatizzati per il monitoraggio dell'opera devono tuttavia essere concepiti come un'integrazione e non come un sostituto dell'ispezione visiva.

Per l'ingegnere strutturale addetto al collaudo di ponti l'occhio umano rappresenta il mezzo di rilevamento per eccellenza. Al pari di un bravo medico, egli esegue una diagnosi sulla base dell'esperienza maturata e redige una prima valutazione sullo stato dell'opera alla luce dell'aspetto esteriore. Egli può così riconoscere immediatamente eventuali crepe e la loro posizione, ma anche macchie di umidità, alterazioni di colore, fenomeni di corrosione, distacchi, deformazioni e molto altro ancora. Un ulteriore affinamento dello stesso principio di percezione è consentito dall'utilizzo di dispositivi quali lenti per l'individuazione di crepe e fessurazioni, microscopi, endoscopi o telecamere. Per le analisi di caratteristiche non desumibili dall'aspetto esterno è necessaria una serie di misurazioni e metodi di prova, come per esempio sclerometri, apparecchi per l'analisi della corrosione, pacometri o misuratori di spessore.

L'esame di ponti consiste essenzialmente in diverse prove singole, la cui applicazione è a discrezione dell'ingegnere collaudatore. Di seguito vengono elencati a titolo esemplificativo diversi ambiti di un ponte in calcestruzzo che devono essere sottoposti a prova. Al proposito va rilevato che oltre a tutti i componenti dell'opera vengono analizzate anche le fondamenta nonché tutte le strutture che si trovano a contatto con il suolo.

I ponti sono stati finora costruiti con una vita utile di 50-100 anni. Grazie a nuovi materiali ad alto rendimento è possibile dimensionare e costruire ponti della vite utile di 200 anni. L'obiettivo deve essere quello di ottimizzare la vita utile grazie a un monitoraggio economicamente fattibile e garantire la funzionalità dell'opera. I punti deboli e le caratteristiche più importanti da considerare in una valutazione della vita utile sono:

**Calcestruzzo:**

Depositi di sporco, residui, agenti atmosferici, distruzioni, nidi di ghiaia, penetrazione di umidità, tracce di acqua, efflorescenze, macchie di ruggine, armatura esposta, crepe, danno meccanico, danni da incendio, copertura in calcestruzzo, spazi vuoti, carbonatizzazione, danni causati da cloruro, differenze di stabilità del calcestruzzo.

**Calcestruzzo armato:**

Posizione e diametro, crepe causate da e/o azioni forzate, crepe lungo l'asse delle barre, fessurazioni superficiali, danni causati da corrosione, modifiche da espansione

**Elementi di pre-compressione:**

Crepe lungo l'asse dell'elemento di precompressione, sezioni di guaine riempite in modo incompleto, danni da corrosione, rotture degli elementi, modifiche da espansione

**Acciaio profilato:**

Corrosione, rotture dei giunti saldati, distacchi della protezione contro la corrosione, plastificazione

**Ancoraggi e giunti:**

Stato e modifica da espansione

**Appoggi del ponte:**

Stato e funzione, posizionamento errato, danni dell'appoggio

**Crepe:**

Tipo di crepa: Crepa da corrosione, ritiri igrometrici, assestamento, frattura tensile, andamento, larghezza e profondità della crepa, modifica della larghezza della crepa rispetto alla precedente misurazione

**Piastre di giunti:**

Stato, funzione e tenuta, crepe

**Impermeabilizzazione:**

Stato e tenuta

**Drenaggio:**

Funzione

**Ulteriore dotazione:**

Impermeabilizzazione delle fughe, danni al manto stradale, ringhiere, piloni, illuminazione

**Superficie del terreno:**

Assestamenti, fratture, smottamenti

Un elemento essenziale nella metodica del monitoraggio delle opere strutturali è costituito dalla rilevazione geometrica dell'opera nonché delle sue modifiche. Oggetto della misurazione sono le deformazioni dell'opera a livello globale e locale come spostamenti, rotazioni, piegamenti, bombature, ma ovviamente anche i requisiti della documentazione dell'opera stessa. A prescindere dai metodi speciali, esistono cinque metodi geodetici, adatti per l'analisi dell'opera: rilievo manuale delle quote fisiche, fotogrammetria, tachimetria, diverse procedure di scansione e GPS. Il funzionamento non a contatto è senz'altro vantaggioso, ma i metodi ottici sono sensibili anche agli influssi atmosferici.

In molti casi si può valutare in modo sufficientemente affidabile la vita utile residua solo mediante un'ideale ispezione dell'opera o un monitoraggio.

Le conoscenze sullo stato della struttura e del materiale acquisite mediante l'analisi dei dati di ispezione e monitoraggio costituiscono una base decisionale fondamentale per la valutazione basata sui risultati del monitoraggio. Nell'ambito di un monitoraggio dell'opera preventivo, mediante le conoscenze derivanti da prove di laboratorio e osservazioni sul campo si possono individuare e modellare i processi di danneggiamento come processi in funzione del tempo. Inoltre, l'opera può essere analizzata mediante un'analisi degli elementi finiti non lineare al fine di poter valutare i diversi modelli di rottura e i relativi effetti. Con riferimento a uno stato limite, sul presupposto di variabili di base e dipendenze temporali, può anche avvenire una modellazione stocastica. Con l'accoppiamento di un'analisi strutturale e un'analisi probabilistica graduale si può effettuare un'analisi della probabilità di collasso [5].

Mediante estrapolazione in un determinato periodo si possono calcolare la stima dell'aspettativa di vita, il collaudo dei valori di resistenza o l'incremento dei potenziali di danneggiamento. Allo stato finale non si deve scendere sotto i valori minimi prefissati per la stabilità e la idoneità all'uso.

Un monitoraggio integrato con conseguente identificazione della struttura crea i presupposti per un'adeguata previsione della vita utile e l'affidabilità delle opere strutturali.

### **3. Gestione del ciclo di vita e monitoraggio**

Ai fini di una progettazione efficace del mantenimento la cosiddetta gestione del ciclo di vita (Life Cycle Management, LCM) è di fondamentale importanza [9]. L'elemento centrale di un siffatto Life Cycle Management è la determinazione oggettiva e quantificabile dello stato attuale di un ponte. Solo attraverso una descrizione quantitativa dello stato attuale e mediante l'impiego di cosiddetti modelli predittivi anche in futuro diviene possibile rilevare lo stato di sicurezza di un'opera mediante metodi probabilistici dell'analisi di sistema e confrontarli con le prescrizioni normative. Benché la rilevazione di stato all'interno di un Life Cycle Management può avvenire anche in forma classica mediante un'ispezione meramente visiva ed eventualmente con singoli sopralluoghi locali approfonditi, il coinvolgimento di concetti estesi di monitoraggio e identificazione del sistema costituisce un passo avanti nella direzione del mantenimento oggettivo e ottimizzato dell'opera [10].

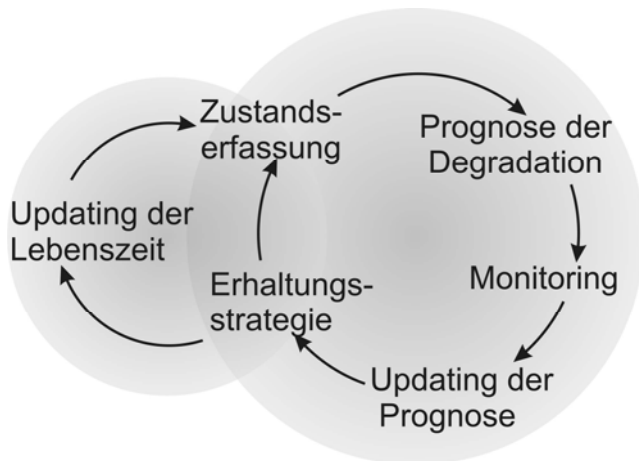


Figura 2: elementi della gestione del ciclo di vita

Poiché una corretta valutazione dello stato è alla base della determinazione delle strategie di mantenimento non solo delle singole opere ma anche delle reti infrastrutturali complessive, risulta evidente la necessità di una base di dati oggettiva e quantificabile. La figura 3 indica in modo schematico il miglioramento atteso nel caso dell'utilizzo di sistemi avanzati di monitoraggio, analisi strutturale e identificazione, che soprattutto consente di evitare inutili ed esosi investimenti [9]. Inoltre si rileva una linea di tendenza che rappresenta lo stato di mantenimento massimo possibile nel caso dell'utilizzo ottimale delle informazioni messe a disposizione dal MIS.

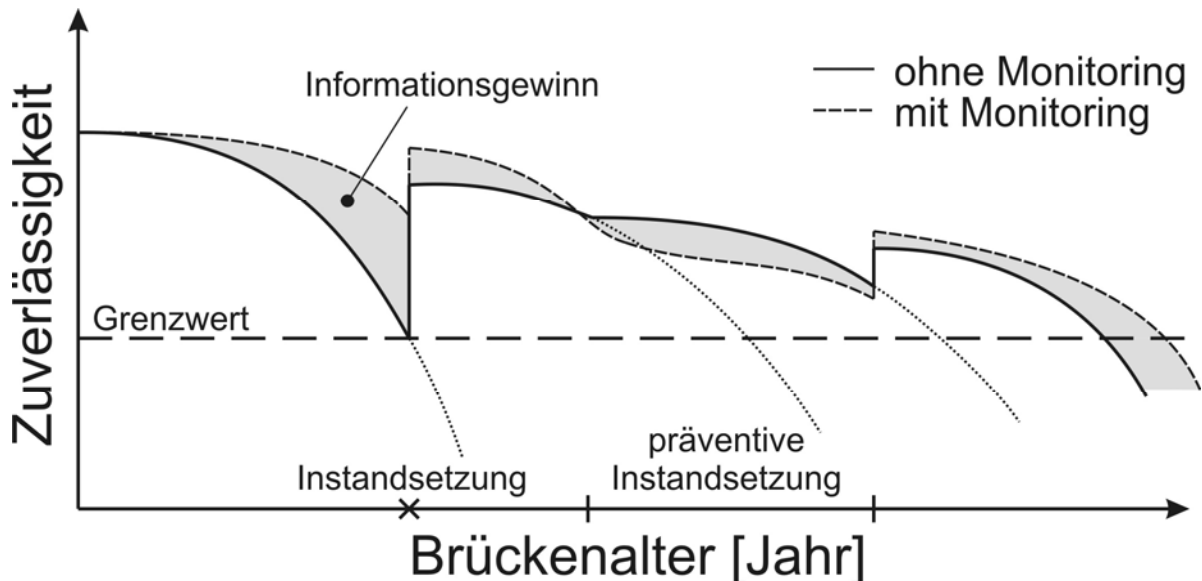


Figura 3: guadagno in termini di sicurezza e di vita utile grazie al monitoraggio e all'identificazione di sistema in sistemi LCM; modificato in base a [6]

Nella letteratura si effettua una distinzione fondamentale tra principio “bottom-up” e “top-down” nella interpretazione dei sistemi di monitoraggio, come è stato dettagliatamente illustrato nel manuale del calcestruzzo (Betonkalender) [4].

#### 4. Controllo internazionale delle opere strutturali

Presupposto di tutti gli interventi di mantenimento dell'opera (DIN 31051 [13]) è il controllo della stessa, che in Europa deve avvenire in funzione del tipo di opera strutturale a determinati intervalli di tempo e in una misura definita. Le differenze esistenti derivano tra l'altro dai diversi tipi di effetto, dalle frequenze e dalla durata degli effetti nonché dal fabbisogno di sicurezza dipendente dal tipo di opera [4].

In Germania, il monitoraggio dei ponti è disciplinato dalla DIN 1076 [14], in Austria dalla RVS 13.71 [15] e in Svizzera dalla direttiva "Überwachung und Unterhalt der Kunstbauten der Nationalstrassen" (monitoraggio e mantenimento delle opere civili sulle strade nazionali) [16].

La DIN 1076 [14] (Opere strutturali su strade e vie. Monitoraggio) disciplina il monitoraggio e il controllo di ponti stradali in Germania, laddove ai sensi della DIN le opere che presentano una campata superiore a 2 m devono essere classificati come ponti. Per il rilevamento dello stato di mantenimento, nella DIN 1076 viene operata una distinzione tra "osservazione costante", "sopralluogo" e "controllo dell'opera", che possono essere definiti come di seguito [4]:

L'osservazione costante viene eseguita trimestralmente nell'ambito di un controllo su tratti. Inoltre, due volte all'anno tutti i componenti sul piano campagna o a livello della circolazione vengono sottoposti a esame senza particolari strumenti ausiliari per l'individuazione di eventuali danni evidenti, e vengono documentati solo quelli che indicano un possibile pericolo per la stabilità.

Il sopralluogo avviene una volta all'anno tranne negli anni in cui è previsto un controllo e aggiuntivamente nel caso di eventi straordinari come piana o gravi incidenti che potrebbero rappresentare un pericolo per la stabilità. Un sopralluogo viene svolto senza particolari strumenti di ispezione, ma utilizza tutte le apparecchiature di ispezione presenti sull'opera, come per esempio spazi vuoti calpestabili.

A norma DIN 1076 il controllo comprende "controlli semplici", "controlli principali", "controlli originati da un motivo particolare", "controlli secondo norme speciali". In generale tutti i controlli devono essere eseguiti da un ingegnere esperto e i relativi risultati devono essere protocollati in un rapporto di prova. Le prove principali devono essere eseguite prima dell'accettazione della prestazione edile, prima dello scadere del periodo di garanzia e successivamente ogni sei anni e comprendono un controllo approfondito di tutti i componenti. I controlli semplici dimezzano l'intervallo di ispezione, non richiedono particolari dispositivi e monitorano soprattutto i difetti conosciuti. I controlli originati da un motivo particolare (controlli speciali) vengono eseguiti esclusivamente quando l'osservazione continua o il sopralluogo accerta l'esistenza di difettosità, ovvero quando l'effetto di eventi importanti sulla sicurezza dell'opera non è chiaro. La sua portata dipende dall'evento che lo ha originato, tuttavia non ha alcun influsso sugli intervalli periodici.

Informazioni più dettagliate sulla definizione di questi intervalli di ispezione, sullo svolgimento di un esame approfondito nonché sui requisiti degli ingegneri collaudatori sono disponibili nel Betonkalender 2009 [4]. Ai fini di una maggiore

oggettività dei risultati e della conservazione della qualità del monitoraggio e controllo dell'opera, a norma DIN 1076 la sua esecuzione si suddivide tra più unità organizzative [16], l'ufficio preposto alla costruzione stradale e l'ufficio preposto alla manutenzione delle strade.

In Germania, la valutazione dello stato avviene conformemente alla direttiva per la rilevazione, valutazione, registrazione e analisi dei risultati delle prove sulle opere strutturali a norma DIN 1076 (Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076; RI-EBW-PRÜF) mediante valutazione dei danni attraverso parametri per la stabilità, la sicurezza stradale e la durabilità e viene espressa con voti compresi tra 1 e 4, ove 1 equivale a uno "stato dell'opera ottimo" e 4 a uno "stato dell'opera insufficiente".

## **5. Monitoraggio dei ponti e vita utile**

### **5.1 Sistemi di monitoraggio permanenti e periodicamente limitati**

In linea di principio occorre distinguere tra sistemi di monitoraggio permanenti e periodici. Questi ultimi comprendono sia sistemi installati in modo fisso che vengono attivati solo a determinati intervalli di tempo sia sistemi mobili che possono essere applicati su un determinato numero di opere (ponti) nella rete infrastrutturale esistente. Al tipo e al numero di sensori a tal fine impiegati non viene teoricamente posto alcun limite, benché ovviamente determinate grandezze di stato come per esempio la tensione dell'armatura o le reazioni dei supporto siano accessibili solo in modo limitato ai sistemi mobili e di norma riflessioni sull'economicità riducono tali sistemi al minimo.

Se per una struttura concreta è disponibile un sistema di monitoraggio, qualunque esso sia, i dati così ottenuti possono essere presi in considerazione per un aggiornamento corrente o periodico dei modelli di struttura, degrado e carico, con cui la qualità e la precisione della valutazione di stato derivata nonché la relativa estrapolazione possono essere aumentate in futuro in modo significativo. Nell'ambito della gestione del ciclo di vita, per una singola struttura, ma anche per una maggiore rete infrastrutturale può essere conseguentemente realizzata una pianificazione del mantenimento ottimizzata in termini di costi e livello di sicurezza

### **5.2 Sistema di monitoraggio dinamico**

L'idea di avvalersi di parametri di sistema dinamici per la valutazione di opere e componenti, è relativamente antica e le basi teoriche sono altrettanto bene studiate. I parametri determinanti come frequenze e forme proprie possono essere desunti da un'analisi dinamica mediante simulazione. Le misurazioni sull'opera vengono viceversa utilizzate per la taratura del modello di calcolo al fine di avvicinarlo di più alla realtà [18]. Di particolare importanza sono al riguardo le condizioni marginali, gli elementi di collegamento, le zone di appoggio dei ponti nonché le ripartizioni di massa e di rigidità. Un modello di qualità sufficiente può essere utilizzato per



l'esecuzione di studio sui parametri al fine di poter pronosticare il comportamento di reazione e gli effetti di modifiche strutturali.

L'idea di base dei metodi di misurazione dinamici per l'accertamento del danno consiste nel fatto che una modifica strutturale o un danno locale nell'opera esercita un influsso sulla risposta di oscillazione dell'opera. Ponti, ma anche altre opere strutturali posseggono un comportamento di oscillazione definito che può essere ben descritto mediante le frequenze proprie, le forme proprie e i valori di smorzamento. A partire da segnali misurati nell'intervallo temporale, attraverso una trasformazione di Fourier è possibile calcolare una risposta strutturale nell'intervallo di frequenza. La determinazione delle frequenze proprie del sistema avviene mediante lettura dei picchi di energia nello spettro di risposta di tutti i punti di misura calcolati in media e appiattiti. Inoltre, le forme proprie pertinenti rappresentano la seconda grandezza essenziale per la descrizione del comportamento dinamico. Esse contraddistinguono determinate forme di oscillazione che sono dissociate da altre forme di oscillazione della struttura e possono esistere indipendentemente l'una dall'altra.

Si distinguono le seguenti oscillazioni:

- Oscillazione smorzata: l'ampiezza diminuisce con l'avanzare del tempo.
- Oscillazione non smorzata: l'ampiezza rimane costante.
- Oscillazione armonica: un oscillatore viene forzato a una determinata frequenza.
- Oscillazione sollecitata: a un oscillatore viene alimentata energia dall'esterno.

Il decremento logaritmico  $\delta$  viene determinato come coefficiente dello smorzamento a partire dal comportamento dinamico dell'oscillazione.

$\delta = \frac{1}{n} \ln \frac{a_i}{a_{i+n}}$	$a_i$ Ampiezza nel periodo $i$	
	$a_{i+n}$ Ampiezza nel periodo $i+n$	(5.1)
	$\delta$ Decremento logaritmico	
$D = \frac{\delta}{2\pi}$	$D$ Coefficiente di smorzamento di Lehr	(5.2)
	$n$ Numero di periodi	

Nel caso di una sollecitazione unica di oscillazione, lo smorzamento di un'opera determina un comportamento dinamico continuo delle oscillazioni finché non si raggiunge la posizione di riposo statica. Le proprietà di smorzamento sono dipendenti dalla frequenza e rappresentano una grandezza determinante per l'identificazione del sistema.

### 5.3 Stima della vita utile

Per descrivere la probabilità di collasso in termini matematici, le grandezze principali sono  $R$  (resistenza) e  $S$  (sollecitazione). Il limite tra collasso e non collasso viene formulato con l'equazione di stato limite  $G$ :

$$G = R - S \quad \begin{array}{ll} G & \text{Stato limite} \\ R & \text{Resistenza} \\ S & \text{Effetto} \end{array} \quad (5.3)$$

Perché vi sia un equilibrio, la resistenza deve essere maggiore o perlomeno uguale all'effetto. La resistenza dipende dal materiale. L'effetto descrive la sollecitazione sul materiale o sulla costruzione.

La vita utile descrive il lasso di tempo che si estende dall'esecuzione dell'opera alla fine della funzionalità dell'opera stessa. Una struttura è funzionale finché sono garantiti, con una certa sicurezza, gli stati limite in termini di stabilità, funzionalità d'uso e di resistenza. La emergente problematica della valutazione della sicurezza viene formulata negli Eurocodici mediante l'introduzione di valori ridotti per l'indice di sicurezza  $\beta$ . Sulla base delle esperienze con costruzioni datate, al termine della vita utile teorica di un'opera devono essere ancora presenti i seguenti valori minimi:

	Periodo di misurazione 1 anno		Intera vita utile	
	$\beta$	$P_f$	$\beta$	$P_f$
<b>Idoneità all'uso</b>	3,0	$1,5 \cdot 10^{-3}$	1,5	$6,7 \cdot 10^{-2}$
<b>Stabilità</b>	4,7	$1,3 \cdot 10^{-6}$	3,8	$7,2 \cdot 10^{-5}$

Tabella 1: Affidabilità della stabilità e dell'idoneità all'uso

Per il calcolo quantitativo della probabilità di collasso sono disponibili metodi probabilistici e software e *VaP* (ETH Zurigo), COSSAN - 1996, CALREL - 1988, *FREET* e *SARA* (Univ. Brunn o BOKU Vienna) [Novák., Rusina, Vořechovský (2003)].

Per descrivere in modo esplicito le modifiche temporali delle proprietà, la funzione dello stato limite viene rilevata nell'ambito delle resistenze mediante variabili di base in funzione del tempo  $XD(t)$ . Per quanto riguarda il calcestruzzo da costruzione, queste possono essere, per esempio:

- gli effetti di scorrimento viscoso,
- la diminuzione della sezione del calcestruzzo armato e armato precompresso a opera di processi corrosivi;
- la riduzione della forza di adesione;
- la maggiore formazione di crepe e pertanto gli effetti sulla deformazione.

Anche l'aspettativa di vita può avvenire sulla base dei risultati analitici o dei dati di misurazione mediante un'estrapolazione nel tempo. Il collaudo dei valori di resistenza o l'incremento di un potenziale di danneggiamento può essere calcolato per eccesso

vincolando un monitoraggio del ponte assieme a un'identificazione strutturale a un determinato periodo (fine vita). Secondo Hasofer e Lind, nello stato finale l'affidabilità necessaria dovrebbe presentare perlomeno un indice di sicurezza di  $\beta_{\min} = 3,8$  e per l'idoneità all'uso di  $\beta_{\min} = 1,5$ . Mediante siffatte stime dell'affidabilità necessaria per una data vita utile si può identificare in modo sostanzialmente migliore il momento degli interventi di mantenimento.

## 6. Letteratura

1. Bergmeister, K.; Santa, U.: Brückeninspektion und –überwachung. In: Betonkalender 2004. Teil 1, S. 409 – 440; Hrsg. K. Bergmeister, J.D. Wörner. Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 2004
2. Wenzel, H. (2009). *Health Monitoring of Bridges*, John Wiley & Sons.
3. Zilch, K., Weiher, H. and Gläser, C. (2009). Monitoring im Betonbau. *Betonkalender 2009*. K. Bergmeister, F. Fingerloos and J. D. Wörner. Berlin, Ernst und Sohn. 2009
4. Strauss, A., Bergmeister, K., Wendner, R. and Hoffmann, S. (2009). System- und Schadensidentifikation von Betonstrukturen. *Betonkalender 2009*. K. Bergmeister, F. Fingerloos and J. D. Wörner. Berlin, Ernst und Sohn. Teil 2: 55-125.
5. Bergmeister, K., Strauss, A., D., N. and Pukl, R. (2007). *Structural analysis and reliability assessment: SARA part I*. Structural Health Monitoring & Intelligent Infrastructure, SHMII-3, Vancouver, Canada.
6. Neves, L. A. C. and Frangopol, D. M. (2004). "Condition, safety, and cost profiles for deteriorating structures with emphasis on bridges." *Reliability Engineering and System Safety* 89: 185-198.
7. Frangopol, D. M., Strauss, A. and Kim, S. (2008). "Bridge Reliability Assessment Based on Monitoring." *Journal of Bridge Engineering* 13(3): 258-270.
8. Wendner, R. (2009). Modale Steifigkeitsidentifikation zur Zustandsbewertung von Strukturen aus Konstruktionsbeton. *Institut für Konstruktiven Ingenieurbau*. Wien, Universität für Bodenkultur. Dissertation.
9. Catbas, N. F., Zaurin, R., Frangopol, D. M. and Susoy, M. (2007). *System reliability-based structural health monitoring with FEM simulation*. Structural Health Monitoring & Intelligent Infrastructure, SHMII-3, Vancouver, B.C., Canada.
10. Vockrodt, H. J., Feistel, D. and Stubbe, J. (2003). *Handbuch Instandsetzung von Massivbrücken: Untersuchungsmethoden und Instandsetzungsverfahren*. Basel, Birkhäuser
11. Gragger, K. (2008). Auszug aus BAUT, Brückenflächen nach Baujahr 1950-2007.
12. Joris, J. P. (2002). Bern, Bundesamt für Straßen der Schweizerischen Eidgenossenschaft - Bereich Kunstbauten.
13. DIN (2003). Grundlagen der Instandhaltung. DIN 31051.
14. DIN (1999). Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen. Überwachung und Prüfung, Normenausschuß Bauwesen (NABau) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V. DIN 1076.
15. RVS (1995). Überwachung, Kontrolle und Prüfung von Kunstbauten - Straßenbrücken. Richtlinien und Vorschriften für den Straßenbau, BmfWA. RVS 13.71.
16. Überwachung und Unterhalt der Kunstbauten der Nationalstrassen (2005). *ASTRA-Richtlinie*. Bern.

17. fib (2003). Monitoring and safety evaluation of existing concrete structures. *Task Group 5.1*. Lausanne, fib - fédération internationale du béton.
18. Clough, R. and Penzien, J. (1993). *Dynamics of structures*. New York, McGraw-Hill.
19. SFB 477: Sicherstellung der Nutzungsfähigkeit von Bauwerken mit Hilfe innovativer Bauwerksüberwachung. TU Braunschweig, 2000
20. Holst, A. (2008). Korrosionsmonitoring und Bruchortung vorgespannter Zugglieder in Bauwerken. 18. *Dresdner Brückenbausymposium. Planung, Bauausführung, Instandsetzung und Ertüchtigung von Brücken*, 11.März 2008. J. Stritzke.
21. Vorwagner, A.: Strukturdynamisches Verhalten externer Spannglieder. Diplomarbeit TU Graz, 2005.
22. Frangopol, D. M. and Liu, M. (2007). "Maintenance and management of civil infrastructure based on condition, safety, optimization, and life-cycle cost." *Structure and Infrastructure Engineering* 3(1): 29-41.
23. Bergmeister, K., Eichinger, E. M., Bonora, P., Cervenka, V., Kollegger, J., Novák, D., Pukl, R., Strauss, A. and Teplý, B. (2003). *SARA structural analysis and reliability assessment, state-of-knowledge, technical background*. Wien.
24. Peeters, B. (2000). System Identification and Damage Detection in Civil Engineering. *Faculteit Toegepaste Wetenschappen*, Katholieke Universiteit Leuven. Dissertation.
25. Wenzel, H. and Pichler, D. (2005). *Ambient vibration monitoring*. England, John Wiley & Sons Ltd.
26. Hoffmann, S. (2008). System identification by directly measured influence lines - A user orientated approach for global damage identification at reinforced concrete bridges. Wien, Universität für Bodenkultur. Dissertation: 149 Seiten
27. Strauss, A., Frangopol, D. M. and Kim, S. (2008). "Statistical, Probabilistic and Decision Analysis Aspects Related to the Efficient Use of Structural Monitoring Systems." *Beton- und Stahlbetonbau* 103: 23-28.
28. Clough, R.; Penzien, J.: *Dynamics of structures*. New York, 1993
29. Maeck, J. (2003). Damage assessment of civil engineering structures by vibration monitoring. *Faculteit Toegepaste Wetenschappen*, Katholieke Universiteit Leuven.
30. Liebig, J.P.; Grünberg, J.; Hansen, M. (2009): Monitoring von Spannbetonbrücken - Auswirkung zunehmenden Schwerverkehrs. In: *Beton- und Stahlbetonbau*, Heft 6, Berlin, S. 368 - 371
31. Bogath, J.; Bergmeister, K.: Ein neues Lastmodell für Straßenbrücken. In: *Bauingenieur*, Heft 6, 1999