



Zürich, 3. Mai 2005

## Inspektionsstrategien für den optimalen Unterhalt von Bauwerken

Daniel Straub

Institut für Baustatik und Konstruktion  
ETH Zürich



### Lebenszyklus eines Bauwerks



### Lebenszyklus eines Bauwerks

#### Entscheidungen



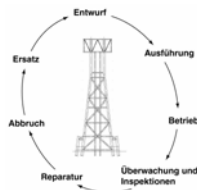
### Lebenszyklus eines Bauwerks

#### Unsicherheiten



### Lebenszyklus eines Bauwerks

- Entscheidungen müssen getroffen werden unter Unsicherheiten über den Zustand des Bauwerks.
- Inspektionen (in jeder Phase) können die Unsicherheiten reduzieren.
- Ein grosser Teil dieser Unsicherheiten ist mit Schädigungen verbunden.
- Beispiel Zárate-Brazo Largo Brücke





### Gliederung

- Lebenszyklus eines Bauwerks
- **Bauwerksschädigungen und ihre Modellierung**
- Die Bedeutung und Modellierung von Inspektionen
- Planung von Inspektionen unter Berücksichtigung von Risiko-Akzeptanz
- Berechnen und Optimieren von Lebens-Zyklus-Kosten
- Anwendungen:
  - Beispiel Ermüdung von Offshore Plattformen
  - Beispiel Beton-Korrosion
- Schlussfolgerungen

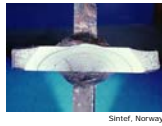
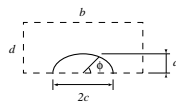
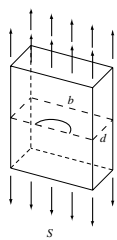


### Schädigungsprozesse



### Quantitative Modellierung von Schädigungsprozessen

- Ziel: Prognose der Schädigungsentwicklung mit der Zeit
- Schädigung beschrieben durch die geometrischen Charakteristika
- Beispiel Risswachstum durch Ermüdung:



### Quantitative Modellierung von Schädigungsprozessen

- Beispiel Risswachstum durch Ermüdung: Rissgröße als Funktion der Zeit
- Modifiziertes Gesetz von Paris:

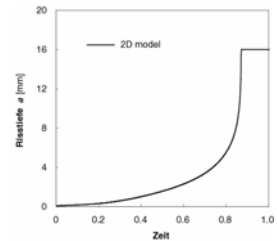
$$\frac{da}{dN} = C_{p,a} (\Delta K_{\sigma}(a,c))^{m_a}$$

$$\frac{dc}{dN} = C_{p,c} (\Delta K_{\sigma}(a,c))^{m_c}$$

mit

$$a(N = N_f) = a_0$$

$$c(N = N_f) = c_0$$



### Unsicherheiten in der Modellierung

- Verschiedenste Gründe für Unsicherheiten in der Prognose
- Probabilistische Modellierung: Modell-Parameter sind stochastische Größen

Table- Parameters of the FM models

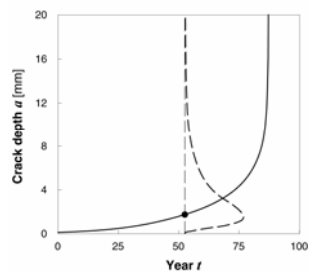
Parameter	Dimension	Distribution	Mean	COV
$V_p$	yr <sup>-1</sup>	Det.	10 <sup>7</sup>	
$T_{IG}$	yr	Det.	40	
$\Delta S_p$	Nmm <sup>-2</sup>	Det.	22.26	
$B_1$	-	Lognormal	1	0.25
$\eta_1$	-	Det.	1.5	
$\ln C_p$	Corresponding to N & mm	Normal	-30.91*	0.77
$m_{FM}$	-	Det.	$m_{FM} = f(C_p)$	
$Y_{DR}$	-	Lognormal	1.20*	0.1
$a_0$	mm	Exponential	0.11	0.11
$a_0/c_0$	-	Det.	0.2	
$d$	mm	Det.	16	

\* these parameters are calibrated to the SN model



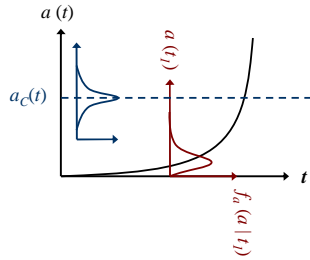
### Unsicherheiten in der Modellierung

- Verschiedenste Gründe für Unsicherheiten in der Prognose
- Probabilistische Modellierung: Modell-Parameter sind stochastische Größen



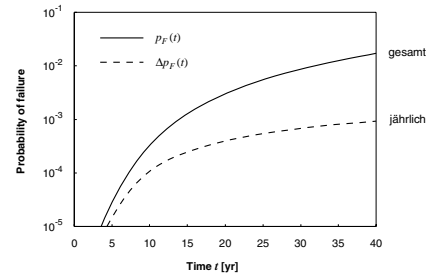
### Versagenswahrscheinlichkeit als Funktion der Zeit

- Was ist Versagen?
- Definition durch Grenzzustandsgleichungen



### Versagenswahrscheinlichkeit als Funktion der Zeit

- Jährliche und gesamte Versagenswahrscheinlichkeit:



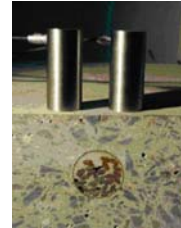
### Gliederung

- Lebenszyklus eines Bauwerks
- Bauwerksschädigungen und ihre Modellierung
- **Die Bedeutung und Modellierung von Inspektionen**
- Planung von Inspektionen unter Berücksichtigung von Risiko-Akzeptanz
- Berechnen und Optimieren von Lebens-Zyklus-Kosten
- Anwendungen:
  - Beispiel Ermüdung von Offshore Plattformen
  - Beispiel Beton-Korrosion
- Schlussfolgerungen



### Inspektion

- Inspektionen reduzieren die Unsicherheiten über den Zustand des Bauwerks
- Sie ermöglichen eine verbesserte Planung von Reparatur und anderen Massnahmen



### Quantitative Modellierung von Inspektions-Qualität

- Likelihood-Funktion:

$$L(x|z) = P(z|x)$$

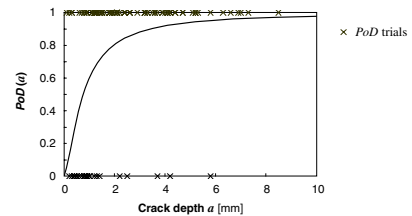
Zustand  
 ↓  
 ↑  
 Beobachtung

		Beobachtung	
Zustand		Intakt	Defekt
Intakt	ok	Falscher Alarm	
Defekt		Missed	Entdeckung



### Quantitative Modellierung von Inspektions-Qualität

- Beispiel Magnetpulver-Prüfung zur Rissentdeckung:



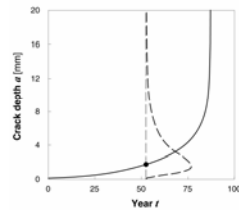
$$PoD(a) = P(D|a)$$

↑ Risslänge  
↑ Entdeckung



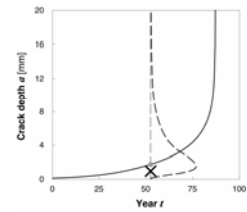
### Einfluss der Inspektion auf das Schädigungsmodell

- Unsichere Vorhersage der Schädigung



### Einfluss der Inspektion auf das Schädigungsmodell

- Unsichere Vorhersage der Schädigung
- Inspektionen helfen, die Unsicherheiten zu reduzieren

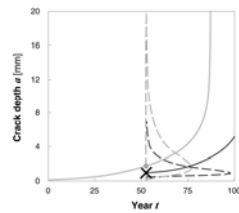


### Einfluss der Inspektion auf das Schädigungsmodell

- Unsichere Vorhersage der Schädigung
- Inspektionen helfen, die Unsicherheiten zu reduzieren
- Aktualisieren des Schädigungsmodells mit Hilfe des Satzes von Bayes:

$$f_x^*(x|z) = \frac{L(x|z) \cdot f_x'(x)}{\int_{\Omega_x} L(x|z) \cdot f_x'(x) \cdot dx}$$

↑ Posteriori Modell   
 ↑ Inspektions Modell   
 ↑ Apriori Modell

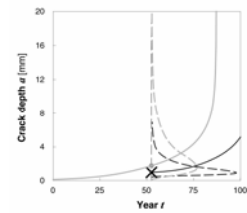


### Einfluss der Inspektion auf das Schädigungsmodell

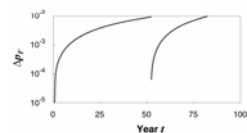
- Unsichere Vorhersage der Schädigung
- Inspektionen helfen, die Unsicherheiten zu reduzieren
- Aktualisieren des Schädigungsmodells mit Hilfe des Satzes von Bayes:

$$f_x^*(x|z) = \frac{L(x|z) \cdot f_x'(x)}{\int_{\Omega_x} L(x|z) \cdot f_x'(x) \cdot dx}$$

↑ Posteriori Modell   
 ↑ Inspektions Modell   
 ↑ Apriori Modell



- Berechnungen durchgeführt mit Hilfe von SRA (Strukturelle Zuverlässigkeitstheorie) oder Simulationen



### Gliederung

- Lebenszyklus eines Bauwerks
- Bauwerksschädigungen und ihre Modellierung
- Die Bedeutung und Modellierung von Inspektionen
- **Planung von Inspektionen unter Berücksichtigung von Risiko-Akzeptanz**
- Berechnen und Optimieren von Lebens-Zyklus-Kosten
- Anwendungen:
  - Beispiel Ermüdung von Offshore Plattformen
  - Beispiel Beton-Korrosion
- Schlussfolgerungen



### Risiko-Akzeptanz

- Verschiedene Ansätze erlauben die Bestimmung des akzeptierten Risikos.
- Diese Kriterien werden vom Betreiber und/oder Besitzer des Bauwerks festgelegt, unter Berücksichtigung der Norm.
- Akzeptanz-Kriterien können direkt aus der Norm abgeleitet werden.
- Normen berücksichtigen Inspektionen, z.B. SIA 262:

Tabelle 10: Widerstandsbeiwert der Ermüdungsfestigkeit  $\gamma_w$

	geringe Schadensfolge	bedeutende Schadensfolge
Schadenserkennung und Schadensbehebung frühzeitig möglich	1,0	1,15
Schadenserkennung und Schadensbehebung kaum möglich	1,15	1,35

- Aber: Die Anzahl und Art der Inspektionen sind nicht vorgeschrieben!



### Herleitung von Risiko-Akzeptanz-Kriterien aus Normen

- NORSOK Anforderungen an die Ermüdungsfestigkeit (als Fatigue Design Factor):

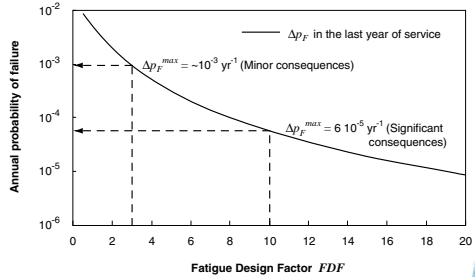
Classification of structural components based on damage consequence	Access for inspection and repair		
	No access or in the splash zone	Accessible Below splash zone	Above splash zone
Substantial consequences	10	3	2
Without substantial consequences	3	2	1

- $FDf = 10$  entspricht dem Akzeptanzkriterium für ein nicht-inspizierbares Bauteil mit grossen Konsequenzen
- Ein Bauteil, welches inspiziert wird, muss mit den Inspektionen die gleiche Sicherheit erreichen wie ein Bauteil mit  $FDf = 10$
- Für Bauteile mit geringeren Versagensfolgen kann das Akzeptanz-Kriterium entsprechend abgemindert werden.



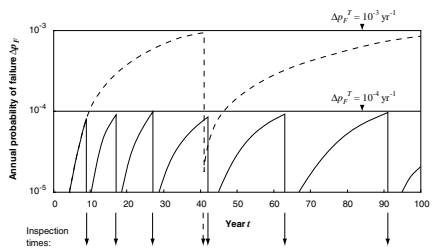
### Herleitung von Risiko-Akzeptanz-Kriterien aus Normen

- Akzeptanz-Kriterium als akzeptierte Versagenswahrscheinlichkeit pro Jahr



### Planung von Inspektionen

- Inspektion wird geplant, bevor das Akzeptanzkriterium überschritten ist
- Gültig solange kein Defekt gefunden wird



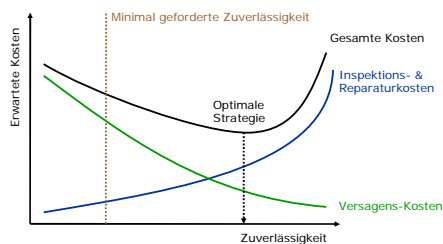
### Gliederung

- Lebenszyklus eines Bauwerks
- Bauwerksschädigungen und ihre Modellierung
- Die Bedeutung und Modellierung von Inspektionen
- Planung von Inspektionen unter Berücksichtigung von Risiko-Akzeptanz
- Berechnen und Optimieren von Lebens-Zyklus-Kosten**
- Anwendungen:
  - Beispiel Ermüdung von Offshore Plattformen
  - Beispiel Beton-Korrosion
- Schlussfolgerungen



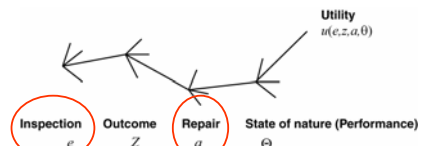
### Berechnen und Optimieren von Lebens-Zyklus-Kosten

- Ziel ist es, die mit einer Inspektions- und Unterhaltsstrategie verbundenen Kosten zu berechnen und zu optimieren



### Der Wert von Informationen

- Inspektionen liefern Informationen über den Zustand des Bauwerks
- Diese Information hat einen Wert, da sie die gezielte Planung und Ausführung von Reparaturen und anderen Massnahmen ermöglicht
- Der Wert dieser Information kann berechnet werden mit Hilfe der Preposterior Analysis, einem Teil der Bayes'schen Entscheidungs-Theorie



- Der erwartete Nutzen einer Strategie (bestehend aus einer Kombination von  $e$  und  $d$ ) wird berechnet durch Integration über  $Z$  und  $\theta$



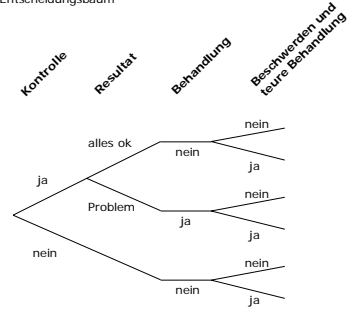
### Der Wert von Informationen – Zahnarzt

- Soll ich zur Kontrolle beim Zahnarzt gehen?



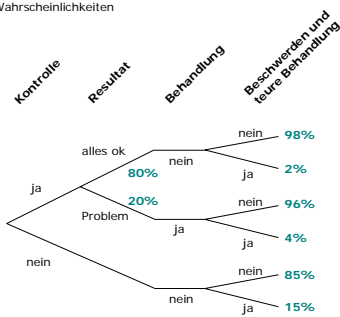
### Der Wert der Kontrolle beim Zahnarzt

- Entscheidungsbaum



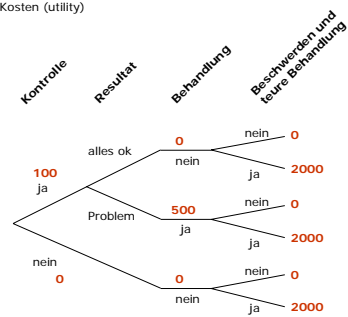
### Der Wert der Kontrolle beim Zahnarzt

- Wahrscheinlichkeiten



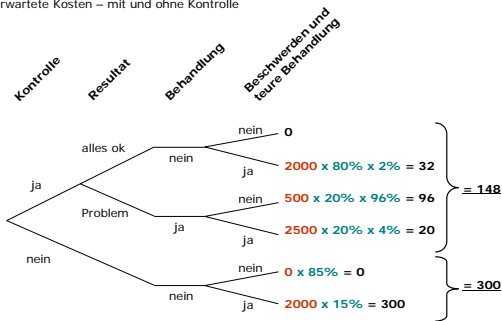
### Der Wert der Kontrolle beim Zahnarzt

- Kosten (utility)



### Der Wert der Kontrolle beim Zahnarzt

- Erwartete Kosten – mit und ohne Kontrolle



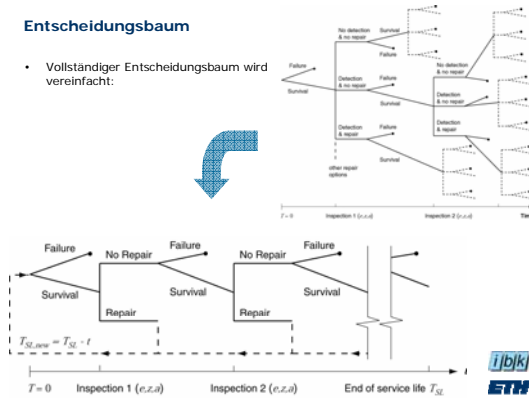
### Der Wert der Kontrolle beim Zahnarzt

- Erwartete Kosten:
  - mit Kontrolle: 148.-
  - ohne Kontrolle: 300.-
- Wert der Kontrolle: 152.- (value of information)
- Weil die Kontrolle 100.- kostet, lohnt sich die Kontrolle zu diesem Zeitpunkt
- aber:
  - Die Wahrscheinlichkeiten ändern sich mit der Zeit. Die Kontrolle lohnt sich erst ab einem bestimmten Zeitpunkt.
  - Der Entscheidungsbaum muss die zeitliche Entwicklung berücksichtigen.
  - Auf diese Weise können die optimalen Zeitpunkte (resp. Intervalle) für Kontrollen bestimmt werden.



### Entscheidungsbaum

- Vollständiger Entscheidungsbaum wird vereinfacht:



### Berechnung der Lebenszykluskosten

- Berechnung der Wahrscheinlichkeiten der verschiedenen Äste im Entscheidungsbaum mit Hilfe der vorgestellten Modelle
- Bestimmen der Kosten von Inspektion, Reparatur, Versagen und des anzuwendenden Zinssatzes

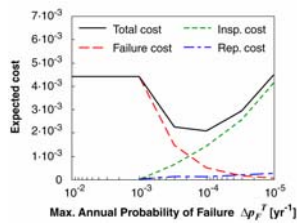
$$E[C_r(\underline{e}, d, T_{SZ})] = \sum_{t=0}^{T_{SZ}} \left[ \frac{1 - \sum_{i=0}^{t-1} p_f(\underline{e}, d, i)}{(1+r)^t} \right] \left[ (\Delta p_f(\underline{e}, d, t)(1 - p_r(\underline{e}, d, t - 1))C_r + p_r(\underline{e}, d, t)E[C_r(\underline{e}, d, T_{SZ} - t)] \right]$$

$$E[C_{ins}(\underline{e}, d, T_{SZ})] = \sum_{t=0}^{T_{SZ}} \left[ (1 - p_r(\underline{e}, d, t)) \left( 1 - \sum_{i=0}^{t-1} p_f(\underline{e}, d, i) \right) \cdot \left[ C_{ins}(e, t) + p_f(\underline{e}, d, t)E[C_{ins}(\underline{e}, d, T_{SZ} - t)] \right] \frac{1}{(1+r)^t} \right]$$

$$E[C_d(\underline{e}, d, T_{SZ})] = \sum_{t=0}^{T_{SZ}} \left[ (1 - p_r(\underline{e}, d, t)) \left( 1 - \sum_{i=0}^{t-1} p_f(\underline{e}, d, i) \right) \cdot \left[ p_f(\underline{e}, d, t)C_d + E[C_d(\underline{e}, d, T_{SZ} - t)] \right] \frac{1}{(1+r)^t} \right]$$

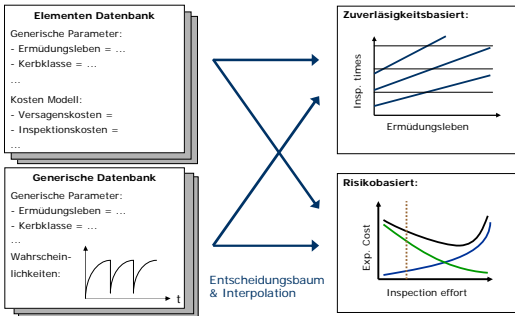
### Optimierung der Lebenszykluskosten

- Berechnen der Kosten für verschiedene maximale Versagens-Wahrscheinlichkeiten



- Akzeptanz-Kriterien müssen immer erfüllt sein

### Generischer Ansatz zur Inspektionsplanung



### Gliederung

- Lebenszyklus eines Bauwerks
- Bauwerksschädigungen und ihre Modellierung
- Die Bedeutung und Modellierung von Inspektionen
- Planung von Inspektionen unter Berücksichtigung von Risiko-Akzeptanz
- Berechnen und Optimieren von Lebens-Zyklus-Kosten
- Anwendungen:
  - Beispiel Ermüdung von Offshore Plattformen
  - Beispiel Beton-Korrosion
- Schlussfolgerungen

### Anwendung – Ermüdung bei Installationen im Golf von Mexiko







### Generische Inspektionsplanung

- Berechnung der Inspektionspläne mittels des generischen Ansatzes
- Parameter:
  - berechnetes Ermüdungsleben
  - Geometrie des Bauteils
  - Lage des Bauteils (über Wasser/unter Wasser)
  - Art der Spannungen (Normal/Biegung)
  - Redundanz des Bauwerks bezüglich Versagen des Bauteils (RIF)

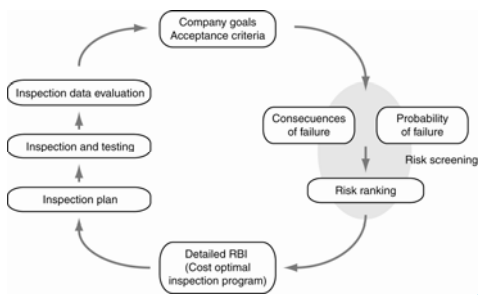


### Generische Inspektionsplanung

- Berechnung der Inspektionspläne mittels des generischen Ansatzes



### Einbettung der Methodik in eine gesamtheitliche Strategie



### Gliederung

- Lebenszyklus eines Bauwerks
- Bauwerksschädigungen und ihre Modellierung
- Die Bedeutung und Modellierung von Inspektionen
- Planung von Inspektionen unter Berücksichtigung von Risiko-Akzeptanz
- Berechnen und Optimieren von Lebens-Zyklus-Kosten
- Anwendungen:
  - Beispiel Ermüdung von Offshore Plattformen
  - **Beispiel Beton-Korrosion**
- Schlussfolgerungen



### Definition von Zustandsklassen

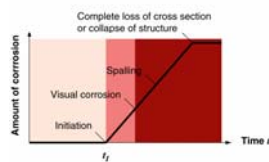
- Der Zustand der Bauteile wird in Klassen beschrieben
- Diese Zustandsklassen sind z.B.
  - keine Korrosion
  - initiierte Korrosion
  - sichtbare Korrosion
- Die Zustandsklassen sind quantitativ definiert durch die zugehörigen Grenzzustandsgleichungen
- Z.B. Initiierung von Korrosion nach DuraCrete:

$$M_1 = g_1(t) = X_1 T_1 - t$$

$$T_1 = \left( \frac{d^2}{4k_1 k_2 k_3 D_0(t_0)} \left[ \exp^{-\alpha} \left( 1 - \frac{C_{cr}}{C_s} \right) \right] \right)^{\frac{1}{1-\alpha}}$$

**VD classification:**

- No corrosion
- Initiated corrosion
- Corrosion



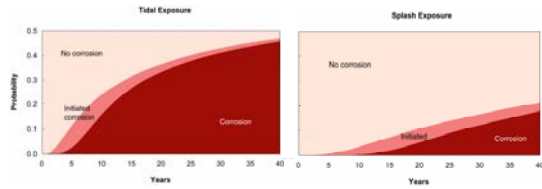
### Indikatoren für die Einteilung in Zustandsklassen

- Indikatoren aus der Entwurfsphase:
  - Baujahr
  - Expositionsklasse
  - Bemessungs-Überdeckungshöhe
  - Beton-Charakteristika (z.B. W/Z-Wert, Zement-Typ)
- Indikatoren aus der Betriebsphase (Inspektionen)



### Wahrscheinlichkeit der Zustandsklassen

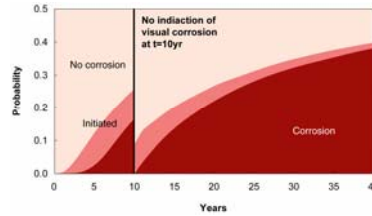
- Z.B. als Funktion der Expositionsklassen:



### Einfluss von Inspektionen: Visuelle Inspektion

- Grenzzustandsgleichung für sichtbare Korrosion:  $g_V(t) = X_i T_i + T_p - t$

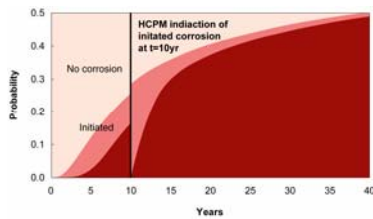
Keine Korrosion ist sichtbar: 
$$P(s_i | \bar{v}) = \frac{P(\bar{v} | s_i) P(s_i)}{P(\bar{v})}$$



### Einfluss von Inspektionen: Potentialfeldmessung

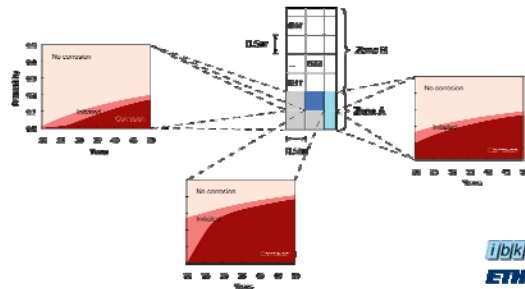
- Grenzzustandsgleichung für initiierte Korrosion:  $g_V(t) = X_i T_i - t$

Potentialfeldmessung weiche Korrosion anzeigt: 
$$P(s_i | CI) = \frac{P(CI | s_i) P(s_i)}{P(CI)}$$



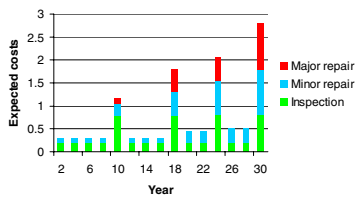
### Räumliche Aspekte bei Betonbauwerken

- Das Bauwerk muss in diskrete Elemente unterteilt werden
- Gemeinsame und individuelle Indikatoren müssen entsprechend berücksichtigt werden



### Risikobasierte Planung von Inspektionen bei Betonbauwerken

- Definition verschiedener Inspektions-/Reparaturstrategien
- Festlegung der Kosten verschiedener Inspektionstypen und Reparaturmassnahmen, zusammen mit dem Zinssatz
- Berechnung der erwarteten Kosten aller Strategien anhand der präsentierten Entscheidungstheorie
- Bestimmen der kostenoptimalen Strategie



### Zusammenfassung

#### Unsicherheiten



### Ausblick

- Generische Methodik eröffnet neue Anwendungsgebiete für die risiko-basierte Inspektionsplanung
- Verbesserung der Modellierung von Schädigungsprozessen / Inspektionsqualität
- Validierung und Verbesserung mit Resultaten aus der Praxis
- Planung von Inspektionen bei grossen/komplexen Systemen



### Schluss

- Besten Dank für die Unterstützung durch
  - Prof. Dr. Michael H. Faber
  - das gesamte IBK
  - Dr. Jean Goyet und viele weitere.
- Die vorgestellten Methoden und Projekte wurden entwickelt und durchgeführt in Zusammenarbeit mit u.a.
  - Pemex Exploración y Producción, Mexico
  - Bureau Veritas, Paris
  - COWI Consulting Engineers, Denmark
  - Maersk Oil and Gas, Denmark
  - Zentech Inc., Houston
- Besten Dank für Ihre Aufmerksamkeit
- Fragen? Fragen!

