

Lebensdauerauslegung für Betonbauwerke

Franz Pruckner

V&C Kathodischer Korrosionsschutz Ges.m.b.H

A-3031 Pressbaum, Josef Perger Strasse 2/A-05

franz.pruckner@vc-austria.com, www.vc-austria.com

Zusammenfassung

Bei allen Betonbauwerken, wo eine sichere verlässliche Funktion gefordert ist, sollte eine Lebensdauerauslegung auf Basis von Zuverlässigkeitsberechnungen durchgeführt werden. Als ein Teil von Lebensdauerauslegungen können Berechnungen oder Abschätzungen von Gesamtsystemkosten zur Entscheidungsfindung herangezogen werden. In der vorliegenden Abhandlung werden die Grundzüge der Zuverlässigkeitsberechnungen kurz vorgestellt. In einem weiteren Schritt werden für ein Betonbauwerk in aggressiver, salzhaltiger Umgebung die Betrachtungen angewandt und verschiedene Alternativen für eine Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit aufgezeigt.

1. Einleitung

Obwohl zerstörerische Prozesse wie die expansive Alkali-Silica Reaktion oder Frost/Tausalzangriff für Betonbauwerke ein Dauerhaftigkeitsproblem darstellen, so sind nicht die Betonabbauprozesse, sondern die elektrochemische Korrosion der Stahlbewehrung – im besonderen wenn das Bauwerk chloridhaltiger Umgebung ausgesetzt ist, welche die stärkste Bedrohung für Stahlbetonbauten darstellen [1]. Daher wurde in der jüngeren Vergangenheit die Forschung verstärkt auf dauerhafte Funktionalität von stahlbewehrten Betonbauten in salzhaltiger Umgebung gerichtet.

Im wesentlichen wird die Depassivierung des Bewehrungsstahls mit Hilfe des 2. Fick'schen Gesetzes in Kombination mit einem zeitabhängigen Diffusionskoeffizienten modelliert [2]. Da jedoch die Parameter für die Dauerhaftigkeit von Beton und die Umweltbedingungen eine große Streuung aufweisen, wurde die zuverlässigkeitsbasierende Lebensdauerauslegung eingeführt und hat sich als wertvolles Werkzeug erwiesen [3-6].

Obwohl es immer noch eines ausreichenden Datensatzes ermangelt, wurde diese Methode bereits erfolgreich an einigen Betonbauten angewandt, wo die Erfordernisse einer kontrollierbaren Nutzungsdauer festgeschrieben wurden.

Die Berechnung oder Abschätzung der Lebensdauererosten führt auch zu einer verbesserten Ausgangslage für die Entscheidungsfindung

2. Strukturelle Zuverlässigkeit

Die Funktionstüchtigkeit eines Bauwerks kann als Zuverlässigkeit dargestellt werden, wobei die Zuverlässigkeit eines Bauwerks oder eines Bauteils als die Wahrscheinlichkeit des "Überlebens" (p_s ...probability of survival) definiert ist, welche zur Wahrscheinlichkeit der Ausfallfunktion (p_f ...probability of failure) in folgender Beziehung steht:

$$\text{Zuverlässigkeit} = p_s = 1 - p_f$$

Gl. 1

Die Ausfallfunktion ist beschrieben als Grenzzustand (LS ... limit state) in Bezug auf verschiedene mögliche Ausfallzustände. Der endgültige Grenzzustand (ULS ... ultimate limite state) beschreibt das Unvermögen des Bauwerks äußeren Lasten zu widerstehen. Der Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (serviceability limite state) wiederum das Unvermögen des Bauwerks den alltäglichen Belastungen oder Anforderungen zu entsprechen. Abbildung 1 zeigt die Entwicklung der Zuverlässigkeit eines Bauwerks über die gesamte Lebensdauer. Wenn sich der Bauwerkszustand soweit verschlechtert hat, sodaß die Funktionalität nicht mehr gewährleistet ist, spricht man von endgültigem Grenzzustand. Durch das Ausführen von Sanierungen ist es möglich, die strukturelle Funktionstüchtigkeit zu erhöhen und der Bauwerksschädigung soweit entgegenzuwirken, daß der endgültige Grenzzustand hinausgeschoben werden kann (= Verlängerung der Lebensdauer). Jedoch können Sanierungsmaßnahmen auch fehlschlagen und die Lebensdauer des Bauwerkes verkürzen. Das kann bei unsachgemäßen lokalen Ausbesserungen bei chloridinduzierter Korrosion der Fall sein [7].

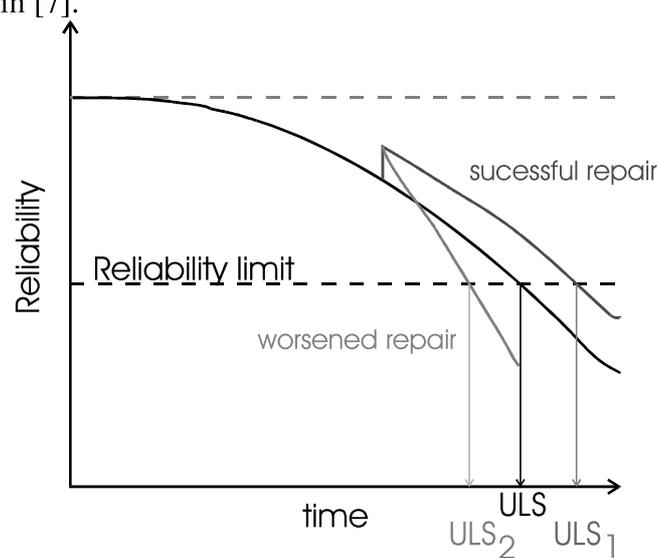


Abbildung 1. Entwicklung der Zuverlässigkeit im Laufe der Lebenszeit. ULS: Endgültiger Grenzzustand des nicht gewarteten Bauwerks; ULS1: endgültiger Grenzzustand bei erfolgreicher Instandsetzung; ULS2: endgültiger Grenzzustand bei mißglückter Instandsetzung.

Um allen Erfordernisse für einen ausfallfreien Betrieb zu genügen, müssen sich alle Grenzzustände während der Lebensdauer innerhalb eines Satzes von festgesetzten Grenzen der Funktionstüchtigkeit befinden. Diese Grenzen beschreiben die Erfordernisse der Funktionstüchtigkeit einzelner Bauteile oder des gesamten Bauwerks. Die Funktionstüchtigkeit von bestimmten Bauteilen hängt von einer Vielzahl von Variablen ab. Wenn die stochastischen Prozesse zur Beschreibung der verbleibenden Belastbarkeit und die wahrscheinlichkeitstheoretischen Charakteristika der Belastungen zu jedweder Zeit bekannt sind, so kann die Wahrscheinlichkeit für die Ausfallfunktion eines Bauteils als Funktion der Zeit dargestellt werden. Sowohl die Belastbarkeit $R(t)$ des Bauwerks als auch die einwirkende Last $S(t)$ kann als Verteilungsfunktion dargestellt werden, wobei die strukturelle Belastbarkeit durch eine kumulative Verteilungsfunktion (CDF ... cumulative distribution function) und die Last als Wahrscheinlichkeitsverteilung (PDF ... probability distribution function) beschrieben wird. Zu jeder Zeit wird die Sicherheitsmargine, $M(t)$, beschrieben durch:

$$M(t) = R(t) - S(t)$$

Gl. 2

Sind R und S statistisch unabhängig, so errechnet sich die Wahrscheinlichkeit für die Fehlfunktion durch:

$$p_f = p[M(t) < 0] = \int_0^{\infty} F_R(x) \cdot f_s(x) dx \quad \text{Gl. 3}$$

mit: $F_R(x)$CDF der Belastbarkeit R,
 und $f_s(x)$ PDF der Last

Der Bereich der möglichen Ausfallsfunktion wird durch die Überschneidung der beiden Funktionen festgelegt (siehe Abbildung 2). Die graphische Präsentation einer Beispielrechnung ist in Abbildung 3 dargestellt.

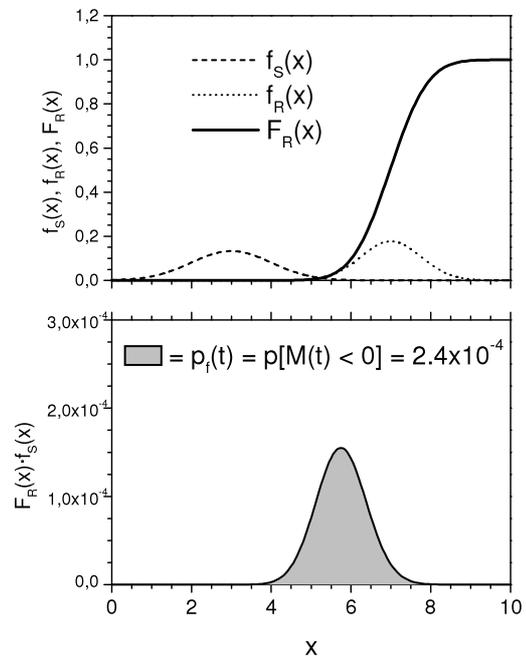
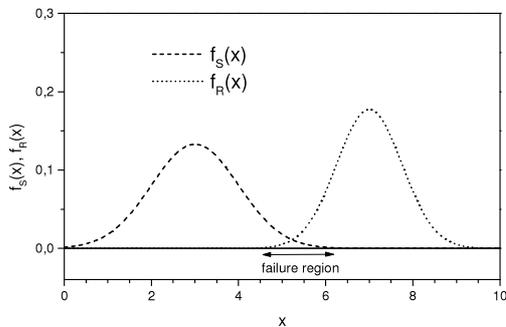


Abbildung 2: Verteilungsfunktion der Belastbarkeit R und der Last S. Der Versagensbereich ist durch die Überschneidung der Kurven bestimmt.

Abbildung 3: Ergebnis einer Beispielrechnung für die Wahrscheinlichkeit der Fehlfunktion (willkürliche Werte eingesetzt).

Wie bereits in der Verteilungsfunktion angedeutet, ist es nicht ganz einfach eine zuverlässige Vorhersage zur strukturellen Performance eines Bauwerkes zu machen, da die Einflüsse der verschiedenen Wartungs- und Sanierungsansätze ganz stark das Resultat beeinflussen. Im Auswahlverfahren ist jedoch die Kenntnis des Einflusses eines jedweden Instandsetzungs- und Wartungsansatzes für die zukünftige Performance des Bauwerkes essentiell: Während der Aufrechterhaltung der strukturellen Zuverlässigkeit zu einem akzeptablen Wert sollen gleichzeitig deren Kosten minimiert werden. Aus diesem Grund sind Berechnungen der Lebensdauer äusserst wichtig für die Lebensdauerauslegung eines Bauwerkes.

3. Lebensdauerkosten

Allgemeines

Eine Kosten-Nutzen-Rechnung läßt sich unter Berücksichtigung der Einzelkosten und Einzelnutzen erstellen und wird oft auch als Gesamtlebensdauerkosten oder Kosten-Nutzen-Risiko Analyse bezeichnet. Die Lebensdauerkosten (LCC life cycle costs) können zur Abschätzung der Wirtschaftlichkeit von

- Anforderungsvorgaben an die Dauerhaftigkeit (Überdeckung, Schutzanstriche, etc.)
- Ausführungsqualität
- Inspektion, Wartung und Instandsetzungsstrategien

Die Lebensdauerkosten eines Bauwerks vom Zeitpunkt der Errichtung bis zum Zeitpunkt t_N lassen sich darstellen durch:

$$LCC(t_N) = C_I + C_{QA} + \sum_{i=1}^{t_N} \frac{C_{IN}(t_i) + C_M(t_i) + C_R(t_i) + \sum_{LS=1}^M p_{f_{LS}}(t_i) \cdot C_{f_{LS}}}{(1+r)^{t_i}} \quad \text{Gl. 4}$$

mit:

- C_I Planungs und Errichtungskosten
- C_{QA} Kosten für die Qualitätssicherung
- $C_{IN}(t)$ erwartete Inspektionskosten
- $C_M(t)$ erwartete Wartungskosten
- $C_R(t)$ erwartete Instandsetzungskosten
- M Anzahl der Grenzzustände, LS
- $p_{f_{LS}}(t)$ jährliche Ausfallwahrscheinlichkeit für den einzelnen Grenzzustand
- $C_{f_{LS}}$ Ausfallkosten die bei Erreichen des einzelnen Grenzzustandes auftreten
- r Diskontsatz

Jedoch ist die eben gezeigte Art der Darstellung der Lebensdauerkosten ungünstig um den Vorteil von Investitionen zur Verlängerung der Lebensdauer aufzuzeigen. Als LCC entsteht nur eine "große Summe". Alternativ lassen sich die Kosten auch als jährliche Equivalentkosten darstellen. Dabei werden die Gesamtkosten des Bauwerkes auf jährlicher Basis die gesamte Lebensdauer aufgeteilt. Die jährlichen Kosten unterschiedlicher Planenscheidungen zur Dauerhaftigkeit eines Bauwerks lassen sich dann besser auf Basis der jährlichen Equivalentkosten vergleichen. Die durchschnittlichen jährlichen Kosten (C_A) während der gesamten Nutzungsdauer (n Jahre) ist gegeben durch

$$C_A(t_N) = \sum_{j=1}^n \frac{p_f(t_j) \cdot r \cdot [C_I + C_{QA} + C_{IN}(t_j) + C_M(t_j) + C_R(t_j)]}{1 - (1+r)^{-t_j}} \quad \text{Gl. 5}$$

wobei $p_f(t_j)$ die Wahrscheinlichkeit für ein Versagen im Jahr j bedeutet und wobei

$$p_f(t_n) = 1 - \sum_{j=1}^{n-1} p_f(t_j)$$

Die Erfahrung hat gezeigt, daß Berechnungen von Jahreskosten einen gangbaren Weg darstellen, um die Vorteilhaftigkeit von höheren Investitionskosten zur verbesserten Dauerhaftigkeit zu verdeutlichen.

Die Berechnung von Lebensdauerkosten können auch weitere Kosten beinhalten, wie die der Verkehrsbehinderungen oder reduzierte Befahrbarkeiten, der Effizienz der Inspektionen, Wartungs- und Sanierungsstrategien.

Es sollte auch eine Sensitivitätsstudie durchgeführt werden, um sicherzustellen, daß die Entscheidungen nicht übermäßig durch Unsicherheiten in der baulichen Zuverlässigkeit, Schäden, Baukosten, und ähnlichen beeinflusst werden.

Lebensdauerkosten am Beispiel einer Hafenanlage

Ein äusserst korrosionsgeschädigter Kai wurde zur Lebensdauerabschätzung und fiktiven Lebensdauerabschätzungen herangezogen. Die Hafenanlage der Dimension 17 m x 132 m wurde 1964 errichtet (siehe). Die mechanischen Hauptlasten stellen zwei Lade/Entladekräne mit je 60 t bzw. 100 t, dar, welche auf Schienen oberhalb der Hauptunterzüge seitlich verschoben werden können.

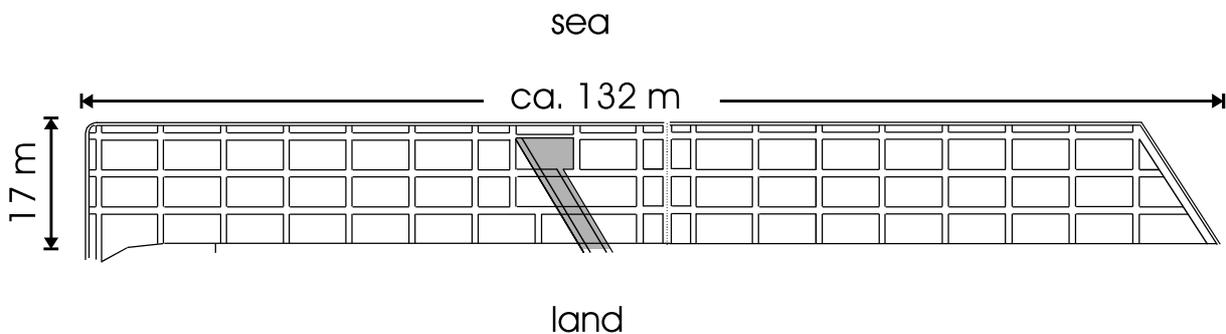


Abbildung 4: Skizze des Kais

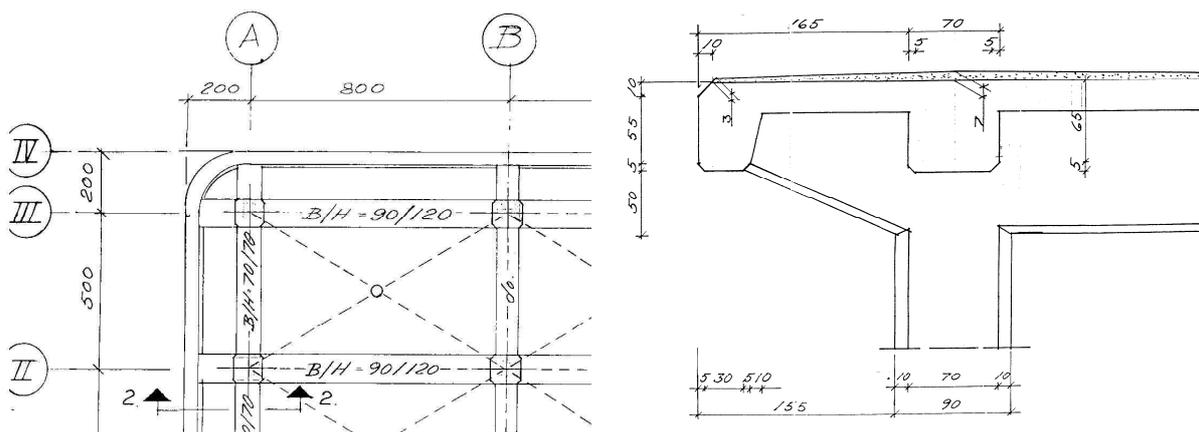


Abbildung 5: Details des Kais

Nach einer Betriebsdauer von 38 Jahren im Jahre 2002 war der Bauwerkszustand stark herabgesetzt. Gemäß strukturellen Einschätzungen wäre die Lastkapazität der Hauptunterzüge nur mehr für kurze Zeit gegeben. Die Korrosionsrate der Bewehrung in den Unterzügen war derart hoch, daß eine sofortige Instandsetzungsmaßnahme unumgänglich war. Die Betonpfeiler waren noch in sehr gutem Zustand, die Deckenunterseiten jedoch bereits so stark geschädigt, daß der Verkehr auf der Betondecke bereits stark eingeschränkt wurde (Abbildung

6). Da von Bauherrenseite nur mehr eine weitere Nutzungsdauer von 15 Jahren gefordert war, entschied man sich für eine speziell ausgelegte Variante von kathodischem Korrosionsschutz (KKS) zur Erreichung dieser Vorgabe, anstelle einer teuren Instandsetzung [8].

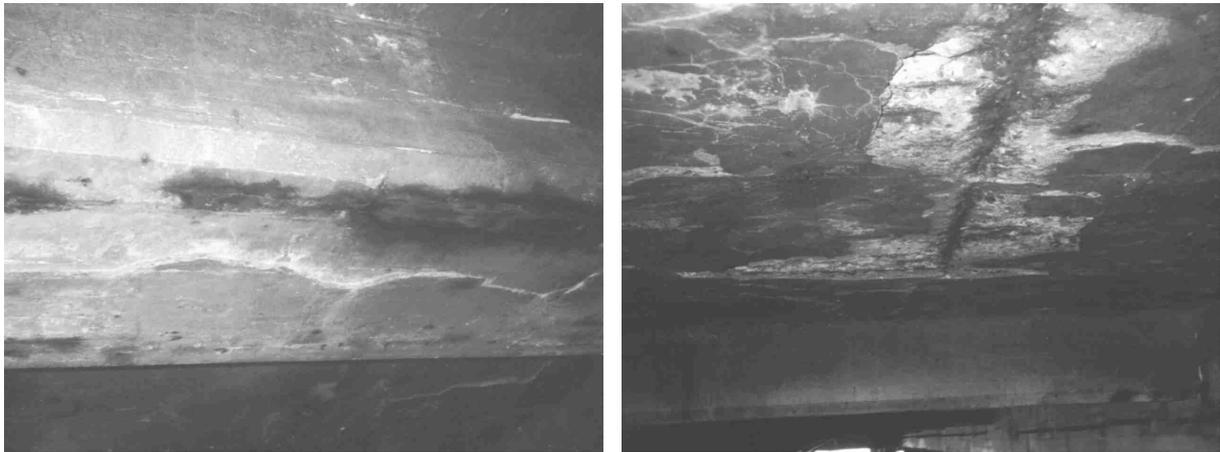


Abbildung 6: Schadensbild der Unterzüge (links) und der Deckenunterseite (rechts) nach 38 Betriebsjahren

Hätte man bei der Errichtung des Kais eine Analyse der Lebensdauerauslegung inklusive Lebensdauerkosten durchgeführt, hätte man wahrscheinlich die Nutzungsdauer kontrollierbar auslegen können.

Würde man selbiges Bauwerk zum heutigen Zeitpunkt noch einmal errichten, würden sich die Lebensdauerkosten für verschiedene Maßnahmen wie im Folgenden beschrieben errechnen, bzw. abschätzen und zu einer fiktiven optimalen Systemscheidung beitragen. Als Basis dienen die Werte der erwähnten Hafenanlage (siehe Tabelle 1)

Betonqualität:	ca. C45
Überdeckung bei Unterzügen:	75 mm
Überdeckung Deckenunterseite	25 mm
Angenommene Neuerrichtungskosten:	3.000.000 €
Betonmenge:	1532 m ³
Betonkosten (145 €/m ³)	222.000 €
Bewehrungsmenge:	315 t
Bewehrungskosten (440 €/t)	139.000 €
Materialkosten bezogen auf Gesamtkosten:	
Beton:	7.4 %
Bewehrung:	4.6 %

Tabelle 1: Schlüsselinformation des Bauwerkes (Alle Kosten auf das Jahr 2002 bezogen).

Folgende mögliche Alternativen zur Beeinflussung der Lebensdauer wurden in Betracht gezogen:

1. Bauweise wie im Jahre 1964 ausgeführt
2. Wie (1) unter Verwendung von Epoxid-beschichteter Bewehrung
3. Wie (1) unter Verwendung von rostfreiem Stahl (AISI 304)

4. Wie (1) wobei 75 % der Bewehrung durch rostfreiem Stahl ersetzt sind (die am stärksten den Chloriden ausgesetzte Bewehrung)
5. Wie (1) unter Verwendung von Bewehrungsstahl verkleidet mit rostfreiem Stahl
6. Wie (1) 75 % der Bewehrung durch rostfreiem Stahl verkleideter Stahl ersetzt sind
7. Wie (1), jedoch Erhöhung der Überdeckung für die Unterzüge von 75 mm auf 100 mm
8. Wie (1), jedoch Verwendung einer Betonqualität entsprechend C70
9. Kombination von (7) und (8)
10. Kathodischer Korrosionsschutz nach 40 Jahren für 15 Jahre.
11. Präventiver Kathodischer Schutz

Im folgenden werden die Lebensdauerkosten (gesamt und jährlich) für die gesamte zu erwartende Lebensdauer ermittelt. Der Einfachheit halber wurde auf eine Berücksichtigung des Diskontfaktors verzichtet. Auch andere Wartungskosten, wie sie sonst üblicherweise anfallen, wurden nicht miteinbezogen.

Bauweise 1 - wie 1964

Die Gesamtlebenskosten betragen 3.000 Mio €. Ein Ende der Nutzungsdauer nach 41 Jahren wurde angenommen (entsprechend der existierenden Hafenanlage). Die jährlichen Kosten betragen 75.600 €.

Bauweise 2 - Epoxid-beschichtete Bewehrung

Mit einem Kostenverhältnis von 1.5 für Epoxid-beschichtete Bewehrung zu gewöhnlicher Bewehrung [9], würden sich die Materialkosten um 207.600 € erhöhen, gleichbedeutend einer Gesamtkostenenerhöhung um 2.3 %. Auch hier wird nur eine Restnutzungsdauer von 3 Jahren angenommen, da die Erfahrung mit dieser Bewehrung uneinheitlich ist. Einige Behörden empfehlen den Gebrauch von Epoxid-beschichteter Bewehrung nicht mehr [10]. Die jährlichen Kosten würden sich auf 76.800 € belaufen.

Bauweise 3 – Rostfreie Bewehrung

Rostfreier Stahl eignet sich ausgezeichnet als Bewehrung für Seebetonbauten. Als Beispiel sei der Progreso Pier in Yucatan, Mexico erwähnt, wo eine dem Typ AISI 304 entsprechende Stahlqualität verwendet wurde. Das Bauwerk ist nun bereits mehr als 60 Jahre, beinahe wartungsfrei in tropisch feuchter und chloridhaltiger Umgebung in Betrieb [11]. Man nimmt an, daß die Verwendung von rostfreiem Stahl die Lebensdauer mindesten verdoppeln [12]. Bei einem Kostenverhältnis von 4.5 [13] von rostfreiem Bewehrungsstahl zu gewöhnlichem Bewehrungsstahl würden sich die Gesamtkosten um 624.000 € oder 16.1 % erhöhen. Bei einer angenommenen zusätzlichen Lebensdauer von 40 Jahren errechnen sich die jährlichen Kosten zu 45.600 €.

Bauweise 4 - Verwendung von 75 % rostfreiem Bewehrungsstahl

Bei Einsatz von rostfreiem Stahl nur für die den Chloriden exponierten Bereiche ließe sich die Menge von rostfreiem Stahl beträchtlich reduzieren. Bei Ersatz von 75 % der Bewehrung mit rostfreiem Stahl erhöhen sich die Materialkosten um 500.400 € oder die Gesamtkosten um 12.1 %. Für eine wiederum angenommene zusätzliche Lebensdauer von 40 Jahren errechnen sich die jährlichen Kosten zu 42.000 €.

Bauweise 5 – Bewehrungsstahl, beschichtet mit rostfreiem Stahl

Der verkleidete Bewehrungsstahl besteht aus einem Kern von gewöhnlichem Kohlenstoffstahl, beschichtet mit einer Schicht von 1 - 2 mm rostfreiem Stahl. Noch ist wenig Information über die Lebensdauer dieses Material erhältlich, jedoch bei Annahme von

einer zusätzlichen Lebensdauer von nur 20 Jahren und einem Kostenfaktor von 3 [9], würden sich die Materialkosten um 414.000 € oder die Gesamtkosten um 9.2 % erhöhen. Die jährlichen Kosten beliefen sich auf 55.200 €.

Bauweise 6 – 75 % Bewehrung beschichtet mit rostfreiem Stahl

Für diesen Fall erhöhen sich die Materialkosten um 206.400 €, oder die Gesamtkosten um 6.9 %. Wenn wiederum eine Verlängerung der Lebensdauer von 20 Jahren angenommen werden kann, errechnen sich die jährlichen Kosten zu 52.600 €.

Bauweise 7 – Erhöhung der Betonüberdeckung

Für die Berechnung des Einflusses der Betonüberdeckung auf das Einsetzen der Korrosion an der Bewehrung und dem Auftreten der ersten Schäden der Überdeckung wurde die empirische Formel aus [14] verwendet. Dabei errechnet sich die Dauer bis zum Einsetzen der Korrosion an der Bewehrung nach:

$$t_{\text{onset}} = \frac{129 \cdot \left(\frac{S_i}{25.4}\right)^{1.22}}{K^{0.42} \cdot (w/c)} \quad \text{Gl. 6}$$

mit: S_iBetonüberdeckung [mm]
 KChlorid Konzentration an der Oberfläche [ppm]
 w/cWasser/Zement Wert

Für das Modellbauwerk würde für eine Überdeckung von 75 mm die Korrosion den Berechnungen zufolge nach 25 Jahren einsetzen. Die Zeit nach der die erste Risse entstehen, verursacht durch die expansiven Kräfte der Korrosionsprodukte, kann nach der empirischen Formel von Lui ermittelt werden [15]:

$$t_{\text{cr}} = \frac{Q_{\text{cr}}}{i_{\text{cr}}} \quad \text{Eq. 7}$$

$$Q_{\text{cr}} = 0.602 \cdot d \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot S_i}{d}\right)^{0.85} \quad \text{Eq. 8}$$

mit: dBewehrungsdurchmesser [mm]
 i_{cr} Korrosionsrate [$\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{day}$]

Bei einem Bewehrungsdurchmesser von 32 mm (gleich dem des Modellbauwerkes) und einer durchschnittlichen Korrosionsstromdichte von $0.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ (entspricht einer Korrosionsrate von $5.8 \text{ g}/\text{cm}^2 \cdot \text{Tag}$, ebenfalls am Modellbauwerk gemessen) würden die ersten Risse ein Jahr nach Einsetzen der Korrosion auftreten. Beim Modellbauwerk entspräche das dem Jahr 1992. Es ist äußerst interessant, daß der Bericht einer Bauwerksinspektion von 1991 noch keine sichtbaren Schäden des Bauwerks beschrieb, jedoch 1995 bereits schwerwiegende Rißbildung beobachtet werden konnte.

Bei einer Erhöhung der Überdeckung von 75 auf 100 mm für die Unterzüge könnte man die Nutzdauer des Bauwerks um 10 Jahre auf ca 50 Jahre erhöhen. Die zusätzlichen Materialkosten beliefen sich dabei auf 8424 € gleichbedeutend einer Erhöhung der Gesamtkosten um 0.2 %. Die jährlichen Kosten beliefen sich dabei auf 60.000 €.

Bauweise 8 – Erhöhung der Betonqualität

Bei einer Verbesserung der Betonqualität von 45 MPa auf 70 MPa Druckfestigkeit für einen Portlandzement Beton ergeben die Berechnungen ebenfalls eine Zunahme der schadensfreien Lebensdauer um ca 10 Jahre. Die zusätzlichen Materialkosten würden in diesem Fall 45.600 € betragen, gleichbedeutend einer Zunahme der Gesamtlebensdauerkosten um 1.5 %. Die jährlichen Kosten beliefen sich in diesem Fall auf ca. 61.200 €.

Bauweise 9 – Erhöhung sowohl der Überdeckung und der Betonqualität

Würde man sowohl die Betonüberdeckung von 75 auf 100 mm erhöhen, als auch die Betonqualität von 45 MPa auf 70 MPa verbessern, so könnte man die schadensfreie Lebensdauer des Bauwerks um 25 Jahre verlängern. Die zusätzlichen Materialkosten beliefen sich dabei auf 69.600, oder einer Zunahme der Gesamtkosten um 2.3 %. Die jährlichen Kosten auf die mögliche Gesamtlebensdauer bezogen beliefen sich dabei auf 45.600 €.

Bauweise 10 – Kathodischer Korrosionsschutz nach 38 Betriebsjahren

Bei Installation von kathodischem Korrosionsschutz am Modellbauwerk nach 38 Betriebsjahren wurde eine zusätzliche Nutzdauer von 15 Jahren projiziert. Die Kosten hierfür betragen 360.000 €. Das entspricht einer Zunahme der Gesamtlebensdauerkosten um 12.0 % Die jährlichen Kosten beliefen sich für die gesamte Lebensdauer auf ca. 64.800 €.

Bauweise 11 – Präventiver Kathodischer Schutz

Für präventiven kathodischen Schutz des Modellbauwerkes kann man 60 €/m² Betonoberfläche veranschlagen. Dazu kämen jährliche Wartungskosten von ca 0.5 €/m². Bei einer zu erwartenden Lebensdauer von 80 Jahren ergäben sich dadurch zusätzliche Gesamtkosten von ca. 305.400 €. Das käme einer Zunahme der Gesamtkosten um 10.2 % gleich. Die jährlichen Kosten auf die gesamte Lebensdauer bezogen würden dabei ca. 42.400 € betragen

Eine Zusammenstellung der verschiedenen Optionen ist in Tabelle 2 gezeigt. Alle Methoden, welche eine Verbesserung des Schutzes der Bewehrung vor chloridinduzierter Korrosion nach sich ziehen bewirken niedrigere jährliche Gesamtkosten für das Bauwerk bezogen auf die Gesamtlebensdauer. Es wird auch klar ersichtlich, daß die teuersten Methoden bezogen auf die Gesamtkosten die langlebigsten Produkte ergeben. Diese Methoden sind aber bei Betrachtung der jährlichen Kosten bezogen auf die mögliche Gesamtlebensdauer am preiswertesten. Davon steigt im vorliegenden Fall am Musterbauwerk eines Kais die Methode der partiellen Ersetzung der Bewehrung mit nicht rostendem Stahl (AISI 304) am günstigsten aus – dicht gefolgt von der Methode des präventiven kathodischen Korrosionsschutzes. Ist daher eine möglichst lange Lebensdauer erwünscht – was für wichtige Bauten der Infrastruktur eigentlich immer der Fall ist – wären diese beiden Methoden den anderen Methoden der Lebensdauerverlängerung vorzuziehen.

Bauweise	Zusätzliche Lebensdauer [Jahre]	Gesamtlebensdauerkosten LCC(t_{end}) [%]	jährliche Kosten am Ende der Lebensdauer $C_A(t_n)$ [$\times 10^3$ €]
1 – wie 1964	± 0	100.0	75.6
2 – Epoxid-beschichtete Bewehrung	+ 0	102.3	76.8
3 – Rostfreie Bewehrung	+ >40	116.1	<45.6
4 – 75 % rostfreiem Bewehrungsstahl	+ 40	112.1	42.0
5 – Bewehrungsstahl, verkleidet mit rostfreiem Stahl	+ 20	109.2	55.2
6 – 75 % Bewehrung verkleidet mit rostfreiem Stahl	+ 20	106.9	52.6
7 – Erhöhung der Betonüberdeckung	+ 10	100.2	60.0
8 – Erhöhung der Betonqualität	+ 10	101.5	61.2
9 – Erhöhung sowohl der Überdeckung und der Betonqualität	+ 25	102.3	45.6
10 – Kathodischer Schutz nach 38 Betriebsjahren	+ 15	112.0	64.8
11 – Präventiver kathodischer Korrosionsschutz	+ 40	110.2	42.4

Tabelle 2: Zusammenstellung der Lebensdauerkosten für die einzelnen Strategien.

3. Schlußfolgerung

Bei Betonbauten, wo eine möglichst lange Lebensdauer erwünscht ist, ist es äusserst wichtig, eine Lebensdauerplanung mit Abschätzung der Lebensdauerkosten durchzuführen. Das Ergebnis dieser Abhandlung deutet an, daß die gezielte Verwendung von nicht rostendem Stahl als Ersatz für gewöhnliche Bewehrung in stark chloridhaltiger Umgebung zu einer hohen baulichen Zuverlässigkeit und gleichzeitig auch sehr wirtschaftlich ist. Das gleich gilt für die Verwendung von präventiven kathodischem Korrosionsschutz.

4. Referenzen

- 1 Gjørv O.E., "Durability and Service Life of Concrete Structures", Proceedings, The first fib Congress 2002, Session 8, Vol. 6, Japan Prestressed Concrete Engineering Association, Tokyo, 2002, pp. 1-16.
- 2 Takewaka, K. and Mastumoto, S., "Quality and Cover Thickness of Concrete based on the Estimation of Chloride Penetration in Marine Environments", ACI SP 109-17, American Concrete Institute, 1988, pp. 381-400.
- 3 "DuraCrete: Modelling of Degradation", The European Union - Brite EuRam III, Project No. BE95-1347: "Probabilistic Performance Based Durability Design of Concrete Structures", Report No. R 4-5, 1998.
- 4 "DuraCrete: General Guidelines for Durability Design and Redesign", The European Union – Brite EuRam III, Project No. BE95-1347: "Probabilistic Performance Based Durability Design of Concrete Structures", Document R 15, February 2000, 109 p.
- 5 Gehlen, C. and Schiessl, P., "Probability-Based Durability Design for the Western Scheldt Tunnel", Structural Concrete No. 2, 1999, pp. 1-7.
- 6 McGee, R., "Modelling of Durability Performance of Tasmanian Bridges", Proceedings, The 8th International Conference on the Application of Statistics and Probability, Sydney, Australia, 1999.

- 7 Raupach, M., "Chloride-Induced Macrocell Corrosion of Steel in Concrete – Theoretical Background and Practical Consequences", *Construction and Building Materials*, 10, 329-338 (1996)
- 8 Pruckner, F., "Diagnosis and Protection of Corroding Steel in Concrete", Dr.ing. thesis 2002:140, Norwegian University of Science and Technology, NTNU, Trondheim, Norway, 2002, 199 p.
- 9 Technical Data Bulletin, "NUOVINOX 316L CLAD REBAR", Stelax Industries Ltd, Dallas, TX
- 10 Griffith, A., Taylor, H.M., "Epoxy Coated Reinforcement Study", Final Report, State Research Project #527, Oregon Department of Transportation, 1999.
- 11 Knudsen, A. and Skovsgaard, T., "The Optimal Use of Stainless Steel Reinforcement in Concrete Structures", *Proceedings, Third International Conference on Concrete under Severe Conditions - Environment and Loading, CONSEC '01, Vancouver*, Ed. N. Banthia, K. Sakai and O.E. Gjrv, 2001, Vol. 2, pp. 1360-1367.
- 12 Cramer, S.D., Covino Jr. B.S., Bullard, S.J., Holcomb, G.R., Russell, J.H., Nelson, F.J., Laylor, H.M. and Soltesz, S.M., "Corrosion Prevention and Remediation Strategies for Reinforced Concrete Coastal Bridges", *Cement & Concrete Research*, 24, 2002, pp.101-117.
- 13 Cramer, S.D., Covino Jr. B.S., Bullard, S.J., Holcomb, G.R., Russell, J.H., Nelson, F.J., Laylor, H.M. and Soltesz, S.M., "Corrosion prevention and remediation strategies for reinforced concrete coastal bridges", *Cement & Concrete Research*, 24, 101-117 (2002).
- 14 Cheung, M.S. and Kyle, B.R., "Service Life Prediction of Concrete Structures by reliability analysis", *Construction and Building Materials*, 10, 45-55 (1996)
- 15 Liu, Y., "Modeling the Time-to-Corrosion Cracking of the Cover Concrete in Chloride Contaminated Reinforced Concrete Structures", PhD thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1996, pp- 34-35.