

Fritz Hunkeler, Peter Matt, Ueli von Matt, René Werner

Quelle: Tagungsheft der fib-CH, Copyright by SIA for fib-CH

Einleitung

Die Vorspanntechnik revolutionierte den Brücken- und Hochbau. Gleiches gilt für die Ankertechnik bei Problemstellungen im Grundbau. Schon früh wurde auf den Korrosionsschutz Wert gelegt, da schon damals bekannt war, dass Spannstähle auf Korrosionsangriffe empfindlich reagieren. Trotzdem traten im In- und Ausland Schäden auf. Darüber gibt es zwar viele einzelne Meldungen und Berichte in Fachzeitschriften und Tagungsdokumentationen, zusammenfassende Darstellungen hingegen sind selten [1], [2], [3], [4], [6], [7], [8], [12]. Die Erkenntnisse aus den aufgetretenen Schäden führten zu einer stetigen Verbesserung der Systeme.

Introduction

The prestressing technique revolutionized the construction of bridges and buildings. The same is true for the anchor technique solving various problems in ground engineering. The importance of an effective corrosion protection was recognized from the outset, as already at that time the sensitivity of the applied prestressing steels to corrosion attack was known. Nevertheless, damage occurred at home and abroad. Although these have been described in many individual papers and reports published in journals and proceedings, comprehensive overviews are rare [1], [2], [3], [4], [6], [7], [8], [12]. The lessons learnt from cases of damage led to a continuous improvement of the systems.

The aim of a recently completed report [5], commissioned by the Swiss Federal Roads Authority, containing also the results of a previous one [4] was

- *to present the technical development of prestressing, stay cable and ground anchor systems and to collect the available systems documentation with the aim of using them as an important basis for the condition survey and evaluation.*
- *to document the existing information and knowledge of the various parties involved in the corrosion damage of prestressing steels found in Switzerland.*
- *to conduct an extensive literature search and to contact experts with the objective of providing further documentation and presenting data on corrosion damage to prestressing steels abroad.*
- *to determine the causes and mechanisms of corrosion damage and to deduce possible hazard scenarios to be considered for the condition survey and evaluation.*



1

Eingestürzter Längsträger der Brücke San Stefano, Sizilien [13]
Failed longitudinal girder of the San Stefano Bridge, Sicily [13]

Mit einem kürzlich abgeschlossenen, vom Bundesamt für Strassen in Auftrag gegebenen Forschungsprojekt [5], das auch die Ergebnisse einer früheren Arbeit [4] berücksichtigt, wurde angestrebt:

- die Entwicklung der Spann-, Schrägseil- und Ankersysteme darzustellen und die verfügbaren Unterlagen zusammenzutragen, um diese als wichtige Grundlage für Zustandserfassungen und -beurteilungen zu erhalten.

- die vorhandenen Unterlagen und das Wissen der Beteiligten über aufgetretene Korrosionsschäden an Spannstählen in der Schweiz zu sichten und aufzuarbeiten.
 - mit Literaturrecherchen und Kontakten zu Experten die Korrosionsschäden an Spannstählen im Ausland als Ergänzung zu den schweizerischen Erfahrungen zu erfassen und darzustellen.
 - die Ursachen und Mechanismen bei Korrosionsschäden zu ermitteln und daraus Gefährdungsbilder abzuleiten, die bei der Zustandserfassung und –beurteilung zu beachten sind.
 - Ansatzpunkte für die Weiterentwicklung der Spann-, Schrägseil- und Ankersysteme zu erarbeiten.
- Viele wichtige Erkenntnisse konnten nur beim Abbruch von Bauwerken gewonnen werden. Einige dieser Objekte wurden im Rahmen des Projektes ZEBRA, «ZustandsErfassung von BRücken während deren Abbruch» untersucht [9], [10]. Im Folgenden werden die wichtigsten Erkenntnisse zusammengefasst.

Spannsysteme

Die Spannbetonbauweise hat sich bisher weitgehend bewährt. Weltweit sind nur wenige vorgespannte Bauwerke eingestürzt. Die wichtigsten Ursachen für Einstürze waren:

- spannungsrissskorrosionsempfindlicher Spannstahl (Beispiel in Deutschland)
- ungeeignete Zemente (Tonerschmelzzement), chloridverseuchte Mörtel oder Betone (chloridhaltiger Sand, CaCl_2 als Beschleuniger) (Beispiele in Deutschland, Jugoslawien und USA)
- ungenügende Überwachung beim Bau und während der Nutzung (Beispiel in Sizilien) (**Bild 1**)
- Wasser- und Tausalzeintrag bei undichten Fugen in evtl. unvollständig verfüllte Spannlieder (Beispiele in Grossbritannien und Belgien).

- *to obtain indications for the further development of prestressing, stay cable and ground anchor systems.*

Many important lessons could only be learnt when structures were demolished. Some of these were investigated within the framework of the project ZEBRA «Condition Survey of Bridges during Demolition» [9], [10].

In the following, the most important findings are summarized.

Prestressing systems

Prestressed concrete could up to the present time be generally regarded as a proven structural form. Worldwide, only a few prestressed structures have collapsed. The most important reasons for failure were:

- *prestressing steel sensitive to stress corrosion (example in Germany)*
- *unsuitable cements (high-alumina cement, calcium aluminate cement), chloride-contaminated mortars or concretes (chloride-containing sands, CaCl_2 as accelerator) (examples in Germany, Yugoslavia and USA)*
- *insufficient surveillance during construction and service (example in Sicily, **figure 1**)*
- *ingress of water and chlorides at leaking joints into not fully grouted tendons (examples in Great Britain and Belgium).*

Only in a few cases, were the reasons mentioned above alone responsible for the collapse. Mostly, the sensitivity of the structure and a combination of different reasons caused the accident.

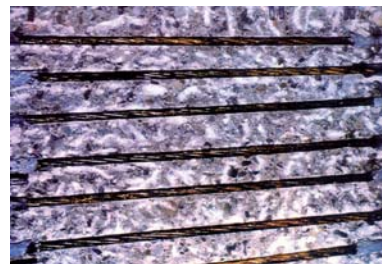
*In Switzerland no collapses of prestressed concrete structures have occurred, but heavily corroded post-tensioning tendons have been identified (**figures 2a and 2b**). **Figure 2a** shows a bridge tendon with heavily corroded prestressing wires. The rupture of one wire was caused by pitting corrosion (total loss of cross-section). In Switzerland, no cases of stress corrosion and hydrogen embrittlement have so far been detected in grouted bridge tendons.*



2a

Lochfrass an Spanndrähten und ein durchgerosteter, gerissener Draht eines Brückenspannglieds [5]

Bridge tendon with prestressing wires corroded by pitting with one wire completely corroded and broken [5]



2b

Korrosion an Monolitzen in der Decke einer Parkgarage [5]

Corroded monostrands in the floor slab of a multi-storey car park [5]

Nur in wenigen Fällen war eine einzige der oben genannten Ursachen allein für einen Einsturz verantwortlich. Meistens führten die Empfindlichkeit der Konstruktion und eine Kombination verschiedener Ursachen zum Unglück.

In der Schweiz gab es bisher zwar keine Einstürze von vorgespannten Betonbauten, wohl aber erhebliche Korrosionsschäden an Spanngliedern (**Bilder 2a und 2b**).

Bild 2a zeigt ein Spannglied einer Brücke mit stark korrodierten Spanndrähten. Der Bruch in einem der Spanndrähte wurde durch den korrosionsbedingten Querschnittsverlust verursacht. Spannungsrisskorrosion und Wasserstoffversprödung als Ursache für gerissene Spannstähle bei zementinjizierten Spanngliedern von Brücken wurden in der Schweiz bisher noch nie beobachtet. Der Korrosionsangriff bei den Monolitzen einer Parkgaragendecke durch Spannungsrisskorrosion führte andererseits zu erheblichen Querschnittsverlusten sowie zum Bruch einzelner Litzen-drähte und einer Litze (**Bild 2b**).

In diesem Falle war der Korrosionsschutz der Monolitzen im Bereich der temporären Schwindgasse ungenügend.

Aus der Auswertung der übrigen Schadenfälle im In- und Ausland konnten die wichtigsten äusseren und inneren Gefährdungen abgeleitet werden. Äussere Gefährdungen sind durch die Umwelt oder die Nutzung bedingt (Einwirkungsseite). Innere Gefährdungen umfassen Schwachstellen der Konstruktion und des eigentlichen Korrosionsschutzsystems der Spannglieder (Widerstandsseite).

In den allermeisten Fällen bildete die Kombination verschiedener Schwachstellen der Konstruktion (Gefährdungsbilder), bei vorhandener äusserer Gefährdung (Leitwirkung), die Schadenursache. Daraus ergeben sich «Schadenketten», die beispielsweise bei Spanngliedern im Verbund oft an der Bauwerksoberfläche beginnen und somit meistens «sichtbar» oder bei Zustandsuntersuchungen feststellbar sind.

*On the other hand, the corrosion attack on monostrands in the floor slab of a multi-storey car park caused considerable loss of cross-section as well as the failure of strand wires and an entire strand due to stress corrosion (**figure 2b**). In this case, the corrosion protection in the area of the temporary construction joint (for allowing shrinkage) was insufficient.*

Based on the evaluation of other cases of damage, it was possible to identify the most important external and internal hazards. External hazards are due to the environment or the service conditions (action side). Internal hazards involve weak structural areas and the intrinsic corrosion protection system of the post-tensioning tendons, the stay cables and the ground anchors (resistance side). The cause of damage is mostly the combination of weak structural areas (hazard scenarios) and an existing external hazard (leading action). Hence, so-called «damage chains» are generated. For bonded tendons, for instance, these start at the surface of the structure and are generally visible or can be detected during inspection.

Stay cable systems

*According to the authors' knowledge, there have been no failures of cable-supported bridges due to corrosion except in the case of a suspension bridge where maintenance was completely neglected (**figures 3a and 3b**).*

*An important reason for this positive assessment is the fact that generally cable-stayed structures are redundant and that the simultaneous failure of several stay cables due to corrosion is rather unlikely. However, the loss of a so-called back stay could cause structural collapse. In some stay cable applications, however, considerable corrosion damages had to be eliminated or stays even had to be exchanged (**figures 4, 5a and 5b**). Compared to post-tensioned tendons in bridges, stay cables are partly exposed to additional*



3a

Lance Mitán-Hängebrücke über den Moruga-Fluss, Trinidad nach dem Einsturz 1998 und Zustand der Hängeseile und der Hänger [14]



3b

Suspension bridge Lance Mitán over the river Moruga, Trinidad, after collapse in 1998 with details of the suspension cables and hangers [14]

4

Ansicht der Schrägseilbrücke Zárate-Brazo Largo, Argentinien [15]
View of the cable-stayed bridge Zárate-Brazo Largo, Argentina [15]



52

Forschung, Entwicklung und Normen

Schrägseilsysteme

Gemäss den Kenntnissen der Autoren gab es bisher wegen Korrosion – abgesehen von einer Hängebrücke wegen des vollständig vernachlässigten Unterhaltes (**Bilder 3a und 3b**) – keine Einstürze von Seilbrücken. Ein wichtiger Grund für diese positive Bilanz ist die Tatsache, dass Schrägseilkonstruktionen in der Regel redundant sind und ein gleichzeitiger Ausfall mehrerer Schrägseile wegen Korrosion eher unwahrscheinlich ist. Ein Ausfall von so genannten Rückhalteseilen («back stays») könnte allerdings zu einem Tragwerksversagen führen. Bei einigen Schrägseilanwendungen waren jedoch erhebliche Korrosionsschäden zu beheben oder gar die Schrägseile auszuwechseln (**Bilder 4, 5a und 5b**).

Zusätzlich zu den für Spannsysteme beschriebenen sind Schrägseile weiteren Einwirkungen ausgesetzt wie direkte Bewitterung, direkte Beaufschlagung durch (chloridhaltiges) Wasser, direkte Sonneneinwirkung (UV-Strahlung) und damit verbunden höhere Temperaturschwankungen und Längenänderungen sowie stärkere schwingende Belastung durch Verkehrslasten, Wind (Vibrationen) etc. Es traten daher auch weitere Gefährdungen auf (z.B. Ermüdungs- und Reibkorrosion).

actions such as direct weather effects, direct water access (containing chlorides), direct sunlight (UV-radiation) and thus related changes in temperature and cable length as well as increased dynamic actions due to traffic loads and wind (vibrations). Further hazards occurred such as fatigue and fretting corrosion.

Ground anchor systems

The anchor technique has become an important part of ground engineering. In some anchors in Switzerland the tensile members have shown considerable corrosion damage, but no catastrophic failure occurred. In general, the damage was found in good time and could be rectified without great cost. In most cases replacement anchors were installed. Worldwide, a comparatively small number of anchored structures have collapsed due to corrosion damage, the main reason being that anchored structures are redundant and often exhibit resistance reserves due to prudent assumptions regarding the characteristic values of the ground.

The distribution of corrosion damage and the corresponding knowledge thereof correlate directly with the development stages of the anchor technique in Switzerland. Due to the lack of systematic examination methods, for the so-called



5a 5b

Korrosionsschäden am gerissenen Schrägseil der Brücke Zárate-Brazo Largo, Argentinien. [16]
Corrosion damage in the failed stay cable of the Zárate-Brazo Largo Bridge, Argentina [16]

Ankersysteme

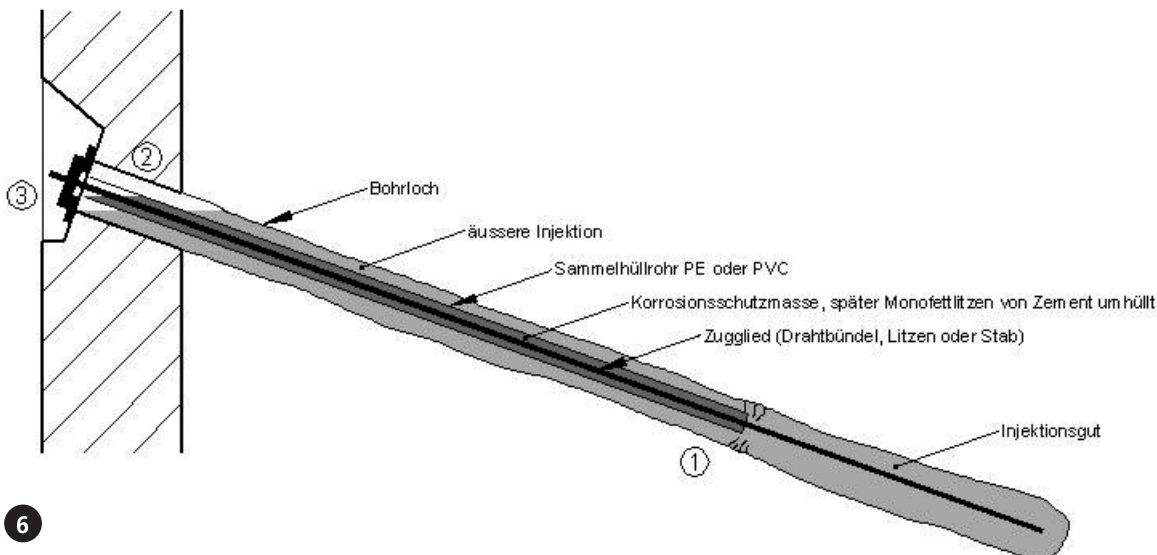
Die Ankertechnik ist zu einem wichtigen Teil der Bautechnik im Grundbau geworden. Bei einigen Verankerungen sind in der Schweiz erhebliche Korrosionsschäden an den Zuggliedern aufgetreten, die aber nicht zu einem katastrophalen Versagen geführt haben. Die Schäden wurden in der Regel rechtzeitig erkannt und konnten mit mehr oder weniger grossem Aufwand behoben werden. In den meisten Fällen geschah dies durch den Einbau von Ersatzankern. Weltweit ist nur eine sehr geringe Anzahl von verankerten Bauwerken wegen Korrosionsschäden eingestürzt. Dies ist dem Umstand zu verdanken, dass verankerte Bauwerke in der Regel redundant sind und oft auch Bemessungsreserven infolge vorsichtiger Annahme der Baugrundkennwerte aufweisen. Die Verbreitung von Korrosionsschäden an Verankerungen und auch der Umfang der Kenntnisse darüber korrelieren direkt mit den Entwicklungsstufen der Anker-technik in der Schweiz.

fully bonded anchors (approx. 1950 until 1975) only the anchor head area can be spot-checked. With good workmanship during execution and a benign environment, cement grout in the free anchor length and in the anchor head area can be a durable protection. The condition evaluation must therefore be based on a risk assessment.

The corrosion protection of anchors having a free anchor length remaining movable during service life without «double corrosion protection» (approx. 1973 until 1983) is generally insufficient (figure 6).

Depending on the type of structure and the quality of the execution, damage to this type of anchor can be found systematically or limited to single cases. It must be considered, however, that quite often non-ductile failures due to stress corrosion occur (figure 7).

The condition survey and evaluation should be based on the examination of a representative number of anchors.



6

Freispielanker ohne «doppelten Korrosionsschutz» (ca. 1973 bis 1983) mit Schwachstellen, wo Wasser zum Spannstahl vordringen kann [5].

1. Risse im zementösen Füllgut (Krafteinleitung)
2. Unvollständige äussere Injektion im Kopfbereich, unvollständige innere Injektion oder weggeflossene Korrosionsschutzmasse
3. Fehlende Schutzhaube, poröser und/oder schlecht haftender Nischenbeton

Ground anchor without «double corrosion protection» (approx. 1973 until 1983) having a free anchor length remaining movable during service life with «weak points» where water can penetrate to the prestressing steel [5].

1. Cracks in cement grout (force spreading zones)
2. Incomplete, exterior grouting in the anchorage area, incomplete, interior grouting or corrosion protection material flown off
3. Missing protection cap, porous and/or recess concrete insufficiently bonded

Bei Vollverbundankern (ca. 1950 bis 1975) können Schäden mangels systematischer Überprüfbarkeit nur stichprobenweise im Ankerkopfbereich ermittelt werden. Bei sorgfältiger Bauausführung und günstigem Umfeld kann die Zementinjektion auf der freien Ankerlänge und im Ankerkopfbereich einen sehr dauerhaften Schutz bewirken. Die Zustandsbeurteilung einer Verankerung muss mit einer Risikoanalyse erfolgen. Freispielanker ohne «doppelten Korrosionsschutz» (ca. 1973 bis 1983) weisen generell einen ungenügenden Korrosionsschutz auf (**Bild 6**).

Je nach Konstruktionskonzept des Bauwerkes und Ausführungsqualität der Verankerung können bei dieser Ankergeneration Schäden systematisch oder auf Einzelfälle beschränkt auftreten. Zu beachten ist, dass bei diesem Ankertyp nicht selten Sprödbrüche infolge Spannungsrisskorrosion eingetreten sind (**Bild 7**).

Die Zustandserfassung und -beurteilung erfolgt anhand der Überprüfung einer repräsentativen Anzahl Anker.

Anker mit «doppeltem Korrosionsschutz» (ca. 1983 bis 1994) weisen generell einen genügenden Korrosionsschutz auf. Schäden werden sich bei dieser Ankergeneration bei vernünftig konzipierten Stützbauwerken auf Einzelfälle beschränken. Weil bei Verankerungen dieser Generation in der Regel auch Überwachungseinrichtungen (Messanker, Extensometer oder Inklinometer) vorhanden sind, kann die Zustandsbeurteilung anhand von Messungen, Ankerkopfspektionen und durch Kraftkontrollen (Abheben) erfolgen.

Bei Ankern mit «umfassendem Korrosionsschutz» (ab 1995) ist die Wirksamkeit des Korrosionsschutzes jederzeit mit einer elektrischen Widerstandsmessung überprüfbar [11]. Bei positiven Messergebnissen sind keine Schäden zu erwarten. Die Zustandsbeurteilung kann anhand von Messungen und stichprobenartigen Ankerkopfspektionen erfolgen.

Anchors with a «double corrosion protection» (approx. 1983 until 1994) are in general sufficiently protected against corrosion. It can be expected that with this anchor generation and reasonably designed structures, damage is limited to single cases. As anchors of this type are generally equipped with surveillance installations (measuring anchors, extensometers or inclinometers), the condition evaluation can be based on measurements, inspection of the anchor head area and checking of the anchor force in the case of lift-off. The effectiveness of anchors with a «comprehensive corrosion protection» (since 1995) can be verified by measuring the electrical resistance [11]. If the resistance requirements are fulfilled no damage will occur. The condition evaluation can be based on measurements and spot-checking in the anchor head area.



7

Ausgebauter Ankerkopf eines Felsankers, alle 6 Litzen gebrochen [5]
Dismantled stressing anchorage of a rock anchor, all 6 strands are broken [5]

Zusammenfassung

Durch die Abklärung der Schadenursache bzw. des Schadenmechanismus bei Korrosionsschäden an Spannstählen in Spanngliedern, Schrägseilen und Ankern konnten wertvolle Erfahrungen gesammelt und Gefährdungsbilder beschrieben werden. Diese Kenntnisse sollen den Systemlieferanten helfen, ihre Systeme weiter zu verbessern, wie auch dazu beitragen, Bauherren und Ingenieure für die Problematik von Spannstahlschäden zu sensibilisieren.

Die Autoren laden alle Leserinnen und Leser ein, ihnen ihre Erfahrungen zugänglich zu machen. Damit können der Kenntnisstand über Schäden an Spannstählen sukzessive vervollständigt, noch bestehende Wissenslücken geschlossen und grössere Schäden oder katastrophales Versagen von Tragwerken vermieden werden.

Summary

By clarifying the cause of damage or the mechanism of corrosion damage to prestressing steels used in post-tensioned tendons, stay cables and ground anchors, valuable lessons could be learnt and hazard scenarios developed. This knowledge can be used by system suppliers to improve their systems and to draw the attention of engineers and owners to the problems arising from corrosion damage in prestressing steels.

Readers are invited to share their experience with the authors. Thereby, our knowledge base for damage to prestressing steels could be gradually completed, the existing gaps in our knowledge eliminated and heavy damage or catastrophic structural failures avoided.

Referenzen / References

- [1] CUR Cases of damage due to corrosion of prestressing steel, Netherlands committee for concrete research, CUR, Report 49, 1971.
- [2] FIP Corrosion and corrosion protection of prestressed ground anchorages, FIP State of the art report, Thomas Telford, London, 1986.
- [3] FIP Corrosion protection of prestressing steels, FIP Recommendations, FIP Commission on Prestressing Materials and Systems, 1996.
- [4] F. Hunkeler, H. Ungricht und P. Matt, Korrosionsschäden an Spannstählen in Spanngliedern und vorgespannten Boden- und Felsankern, Bundesamt für Strassen, Forschungsauftrag 86 / 95, Bericht VSS Nr. 534, 1998.
- [5] F. Hunkeler, P. Matt, U. von Matt und R. Werner, Spannglieder, Schrägseile und Anker – Beschreibung der Systeme und Erkenntnisse aus Korrosionsschäden, Forschungsauftrag AGB 2000 / 470, Bericht VSS Nr. 588, August 2005.
- [6] U. Nürnberger, Analyse und Auswertung von Schadensfällen an Spannstählen, Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Bonn-Bad Godesberg, Heft 308, 1980.
- [7] U. Nürnberger, Studie zu Spannstahlbrüchen, Abschlussbericht zum Forschungsauftrag DBV 210, FMPA, BW, Stuttgart, 1998.
- [8] Management of post-tensioned grouted duct bridges, PIARC (World Road Association), C 11 Committee on Road Bridges, April 1999.
- [9] T. Vogel, Zustandserfassung von Brücke bei deren Abbruch, Bericht zum Forschungsauftrag Nr. AGB 1998 / 101, Entwurf vom Sept. 2005.
- [10] T. Vogel, Zustandsbeurteilung von Brücken bei deren Abbruch, fib-CH-Publikation, fib Kongress Neapel 2006, pp 18-23.
- [11] U. von Matt, Dauerhafte vorgespannte Anker, 1st fib Congress, Osaka, 2002, Betonbau in der Schweiz fib-ch, S. 144 - 147.
- [12] L. Wichter und W. Meiniger, Verankerungen und Vernagelungen im Grundbau, Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH, Berlin, 2000.
- [13] E. Proverbio, G. Laganà, V. Venturi, Il collasso del ponte S. Stefano: Un esempio estremo di degrado delle strutture in calcestruzzo armato precompresso, L'Edilizia, Vol. 15, No. 3, 2001, p. 32-37.
- [14] The collapse of the Lance Mitan suspension bridge, Trinidad, <http://www.seetobago.com/trinidad/sbridge/lmsb1.htm>
- [15] M.H. Faber, D.L. Hommel, R. Maglie, Aspects of safety and operation of bridges during rehabilitation, Proceedings of the International Symposium on «Advances in operation and management of large infrastructure projects», Copenhagen, Denmark, 10-13 May 1998, Editors: L.J. Vincentsen and J.S. Jensen, A.A. Balkema, Rotterdam, 1998, p. 177-188.
- [16] M.H. Faber, Planning of ultra sonic inspections of parallel wire cables, Vortrag anlässlich des 8th ASCE Speciality Conf. on probabilistic mechanics and structural reliability, July 24-26, 2000, University of Notre Dame, South Bend, Indiana (USA). Basis: Artikel von S. Engelund und M.H. Faber mit gleichem Titel.

Autoren / Authors

Fritz Hunkeler
Dr. sc. techn,
dipl. Ing. ETH TFB
Lindenstrasse 10
CH-5103 Wildegg
hunkeler@tfb.ch

Peter Matt
dipl. Bauing. ETH
Ingenieur-Beratung
Talweg 21
CH-3063 Ittigen
PeterMatt@email.ch

Ueli von Matt
dipl. Bauing. ETH
Dr. Vollenweider AG
Badenerstrasse 621
CH-8048 Zürich
vonmatt
@drvollenweiderag.ch

René Werner
Schadenexperte
Korrosion EMPA
Überlandstrasse 129
CH-8600 Dübendorf
rene.werner@empa.ch