R. E. Koller, G. Piskoty, M. Zraggen

Scheme of the Failure Analysis Taking the Example of Profile Wire Breaks in the Support Cable of a Cable Car System

Systematik der Schadensanalyse am Beispiel von Profildrahtbrüchen im Tragseil einer Seilbahnanlage

Received: October 22, 2015
Accepted: November 05, 2015

Eingegangen: 22. Oktober 2015
Angenommen: 05. November 2015
Translation: E. Engert

Abstract

Cable car systems are predominantly used in the Alpine Region for the transportation of passengers and goods. During operation, their components are subjected to environmental influences as well as to static and dynamic loads. Even if standards, measurements, experimental tests, periodic inspections, and maintenance are considered, a component failure can not be entirely excluded. It is for that reason that cases of damage in the cable car industry are clarified based on systematic analyses aiming at prevention and an increase in security.

Kurzfassung

Seilbahnanlagen werden überwiegend in Alpenräumen zum Personen- und Materialtransport eingesetzt. Deren Komponenten unterliegen im Betrieb neben Umwelteinflüssen auch statischen und dynamischen Beanspruchungen. Bauteilversagen kann auch mit Berücksichtigung von Normen, Messungen, experimentellen Versuchen, periodischen Inspektionen und Wartung nie ganz ausgeschlossen werden. Daher werden Schadensfälle – wie in anderen Bereichen – zur Prävention und Erhöhung der Sicherheit auch in der Seilbahnbranche durch systematische Analysen abgeklärt.

Authors:

Roland E. Koller, Gabor Piskoty Empa, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Überlandstrasse 129, CH-8600 Dübendorf;
e-mail: roland.koller@empa.ch, gabor.piskoty@empa.ch
Markus Zraggen IWT, Institut für Werkstofftechnologie AG, Richtistrasse 15, CH-8304 Wallisellen, e-mail: markus.zraggen@iwt-institut.ch

The approach for the identification of the underlying causes of a case of failure is presented using the example of a spectacular incident in 2004 where all external profile wires of a support cable of a 100 passenger aerial tramway broke during operation.

A precautionary and thorough preservation of evidence, detailed examinations of the subject components, clarifications of the operating history of the system, as well as an eventual identification of a probable damage process supported by examination findings are essential steps of this approach.

The findings of such evaluations are the basis for recommendations regarding testing and construction of further systems, their operation, maintenance, and inspections with a focus on damage prevention.

1. Introduction

The following section summarizes an incident on the cable car Mürren – Birg (Switzerland) which occurred on December 29th, 2004 [1–3].

The cabin on track 1, carrying 53 passengers and comprising the support cables A and B, went up the mountain when the cable car personnel heard a loud popping. As the noise was of unclear origin, the system was immediately stopped and the rail was visually checked with the help of a helicopter. Findings indicate that all external profile wires of support cable B were broken at a distance of approx. 60 m from the top station (Fig. 1). All passengers were evacuated by a helicopter and the cable car's operation was stopped. Both support cables of the subject track were partially relieved by allowing them approx. 11 m of slack as well as by lifting the tensioning weight in the valley station for security reasons.

Anhand eines spektakulären Ereignisses im Jahre 2004, bei dem während des Betriebes alle außen liegenden Profildrähte eines Tragseils einer 100-Personen-Pendelbahn brachen, wird die Vorgehensweise zur Abklärung der für das Versagen verantwortlichen Ursachen vorgestellt.

Wesentliche Schritte dabei sind eine sorgfältige, vorsorgliche Beweissicherung, detaillierte Untersuchungen an den schadhaften Komponenten, Abklärungen zur Betriebsgeschichte der Anlage sowie letztlich eine durch Untersuchungsbefunde gestützte Identifizierung eines wahrscheinlichen Schädigungsprozesses.

Mit Fokus auf die Schadensprävention fließen die Erkenntnisse derartiger Abklärungen schliesslich in Empfehlungen hinsichtlich Überprüfung und Konstruktion weiterer Anlagen, Betrieb, Wartung und Inspektionen ein.

1. Einleitung

An der Pendelbahn Mürren – Birg (Schweiz) ereignete sich am 29. Dezember 2004 ein im Folgenden zusammengefasster Vorfall [1–3].

Die mit 53 Personen besetzte Kabine der Fahrbahn 1, bestehend aus den Tragseilen A und B, fuhr bergwärts, als das Bahnpersonal der Bergstation ein lautes Knallgeräusch wahrnahm. Da die Ursache dafür unklar war, wurde die Anlage sofort gestoppt und die Bahn mit Hilfe eines Hubschraubers visuell überprüft. Es zeigte sich, dass ca. 60 m von der Bergstation entfernt alle äusseren Profildrähte des Tragseiles B gerissen waren (Bild 1). Alle Fahrgäste wurden mit einem Hubschrauber evakuiert und der Betrieb der Pendelbahn wurde eingestellt. Aus Sicherheitsgründen wurden beide Tragseile der schadhaften Fahrbahn durch Nachlassen um ca. 11 m sowie durch Anheben des Spannungsgewichtes in der Talstation teilentlastet.

Fig. 1: Support cable B showing a cracked sheath in a distance of about 60 m from the top station (the picture was taken after the partial relief of the support cables A and B)

Bild 1: Tragseil B mit gerissenem Mantel ca. 60 m von der Bergstation entfernt (Aufnahme nach Teilentlastung der Tragseile A und B)

2. Scheme of the Damage Analysis

The damage case was clarified based on internationally recognized guidelines and recommendations [4–7]. The approach can be subdivided into the following phases [5]:

- Preservation of evidence (anamnesis)
- Information on the installation and the case of damage (history)
- Determination of the type of fracture (diagnosis)
- Hypotheses on the cause of the damage and its evolution
- Investigations aiming at supporting or refuting the hypotheses (tests)
- Precautionary recommendations (therapy)

2. Systematik bei Schadensanalysen

Die Abklärung des Schadensfalles stützte sich auf international anerkannte Richtlinien und Empfehlungen [4–7]. Die Vorgehensweise lässt sich in folgende Phasen unterteilen [5]:

- Beweissicherung (Anamnese)
- Informationen zur Anlage und zum Schadensfall (Lebenslauf)
- Ermittlung der Bruchart (Diagnose)
- Hypothesen zur Schadensursache und -entwicklung
- Untersuchungen zur Bestätigung oder Widerlegung der Hypothesen (Versuche)
- Vorbeugende Empfehlungen (Therapie)

A comprehensive clarification of the damage was ensured based on the creation of a team of specialists from the relevant fields of expertise: cable car technology, damage analysis, materials science, fracture mechanics, corrosion chemistry, and non-destructive material testing.

3. On-Site Survey – Preservation of Evidence

As with many cases of damage, the installation parameters and boundary conditions possibly relevant for the clarification of the damage could not be determined at the beginning of the investigation. Therefore, in-depth precautionary surveys were per-

Mit der Bildung eines Spezialistenteams aus den betroffenen Fachbereichen Seilbahntechnik, Schadensanalytik, Werkstoffkunde, Bruchmechanik, Korrosionschemie und zerstörungsfreie Werkstoffprüfung wurde eine umfassende Schadensabklärung sichergestellt.

3. Bestandsaufnahme vor Ort – Beweissicherung

Wie bei vielen Schadensfällen war zu Beginn der Untersuchungen nicht abschätzbar, welche Anlageparameter und Randbedingungen bei der Schadensabklärung relevant sein könnten. Daher wurden vor Ort vorerst detaillierte, vorsorgliche Bestandsaufnahmen

Fig. 2: Documentation and measurements in the damaged area of support cable B

Bild 2: Dokumentation und Messungen im Schadensbereich von Tragseil B

formed on-site to begin with. These surveys covered the visual inspection and photographic documentation of the given condition of both the defective support cable (Fig. 2) and the installation in the top station. In addition to that, the area below the damaged area was searched for potential flung off profile wire fragments.

Those installation parameters which could no longer be reconstructed after removing the support cables were obtained by measurements and logged. The focus was on measuring the support cables A and B of track 1. For comparison purposes, measurements were partially also performed on the support cables C and D of track 2.

4. Information on the Installation

When developing damage hypotheses and during the analysis of damage causes and damage progression, installation-specific information can provide crucial indications. It was for this reason that a maximum of information on the cable car's history was gathered.

The given installation is a "classic" double-track aerial tramway with two cables built in 1965. Both tracks consist of two support cables, respectively. These cables are tensioned in the valley station using a shared tensioning weight. The support cables are individually anchored in the valley station by means of a bollard. Since the installation of the system, several documented revisions and modifications have been performed. In addition to that, the support cables are shifted towards the valley by approx. 20 m about every seven years in order to relieve those cable areas which are subjected to increased bending loads with pylons and station bearings. Thus, an optimal load distribution on the cable and an increased service life of the cable can be achieved.

The support cables were manufactured in 1964 as locked coil ropes (Fig. 3) from rolled, cold-drawn steel wires containing

durchgeführt. Diese umfassten die visuelle Begutachtung und fotografische Dokumentation der sich darbietenden Situation am schadhaften Tragseil (Bild 2) und des Anlagezustandes in der Bergstation. Zudem wurde das Gelände unterhalb des Schadensbereiches nach möglichen, weggeschleuderten Profildraht-Bruchstücken abgesucht.

Diejenigen Anlageparameter, welche nach der Demontage der Tragseile nicht mehr rekonstruierbar waren, wurden messtechnisch erfasst und protokolliert. Im Vordergrund standen Messungen an den Tragseilen A und B der Fahrbahn 1 und zu Vergleichszwecken teilweise auch an den Tragseilen C und D der Fahrbahn 2.

4. Angaben zur Anlage

Bei der Erarbeitung von Schadenshypothesen, Schadensursachen und -verläufen können anlagenspezifische Informationen entscheidende Hinweise liefern. Aus diesem Grunde wurde der Lebenslauf der Seilbahn möglichst umfassend zusammengetragen.

Bei der vorliegenden Anlage handelt es sich um eine "klassische", zweispurige Zweiseil-Pendelbahn, welche im Jahre 1965 erbaut wurde. Beide Fahrbahnen bestehen je aus zwei Tragseilen, die in der Talstation mit einer gemeinsamen Spannmasse gespannt werden. In der Bergstation sind die Tragseile einzeln mit Hilfe je eines Pollers verankert. Seit der Erstellung der Anlage wurden mehrere dokumentierte Revisionen und Modifikationen durchgeführt. Zudem wurden etwa alle sieben Jahre die Tragseile um ca. 20 m talwärts verschoben, um die bei Stützen- und Stationsauflagern erhöhte biegebeanspruchten Seilbereiche zu entlasten. Damit kann eine gleichmäßigere Seilbeanspruchung und somit eine erhöhte Seillebensdauer erreicht werden.

Die Tragseile wurden als einmal verschlossene Spiralseile (Bild 3) aus gewalzten, kaltgezogenen Stahldrähten mit 0.6% Kohlenstoff

Fig. 3: Cross section of the support cables A, B, C, and D

Bild 3: Querschnitt der Tragseile A, B, C und D

0.6% carbon. The rope specifications were completely available. In new condition, they complied with the applicable commissioning requirements. The last routinely performed, non-destructive, magneto-inductive test of the support cable was conducted in April 2004, a few months before the damaging incident. During this test, neither wire breaks nor other damages were detected in support cable B.

5. Investigations on the Support Cables and in the Top Station

5.1 Visual Findings

The visual evaluation of the defective section of the rope was performed on the partially relieved rope on-site (Fig. 2) as well as on the detached rope section with an approx. length of 24 m in the Empa laboratory in Dübendorf. The location and the defor-

im Jahre 1964 hergestellt. Die seilspezifischen Kenndaten waren vollständig vorhanden und entsprachen im Neuzustand den bei der Inbetriebnahme geltenden Anforderungen. Die letzte, routinemäßig durchgeführte, zerstörungsfreie, magnetinduktive Tragseilprüfung fand im April 2004, wenige Monate vor dem Schadensereignis statt. Im Tragseil B wurden dabei weder Drahtbrüche noch sonstige Beschädigungen festgestellt.

5. Untersuchungen an den Tragseilen und in der Bergstation

5.1 Visuelle Befunde

Die visuelle Beurteilung des schadhaften Seilabschnittes erfolgte einerseits am teilentlasteten Seil vor Ort (Bild 2), andererseits am herausgetrennten, ca. 24 m langen Seilabschnitt im Labor der Empa in Dübendorf. Beurteilt wurden primär Lage und Verformung

Fig. 4: Friction marks with scale-like build-ups on the support cable B

Bild 4: Reibspuren mit schuppenartigen Auftragungen am Tragseil B

mation of the broken profile wires as well as the condition of the surface of the rope sections adjacent to the area of damage were primarily evaluated.

In the area of contact with the car's track rollers, these intact sections are characterized by a bare, shiny surface and, on the opposite side, by a rust-brown, normal corrosion condition with grease-like deposits. The cable's surface did neither reveal any color pigments of the car's running gear nor signs of excessive wear. However, on the border of the contact area of the car's track rollers in the intact section of the cable

von gebrochenen Profildrähten sowie der Oberflächenzustand der an den Schadensbereich angrenzenden, noch intakten Seilabschnitte.

Diese intakten Abschnitte zeigten im Kontaktbereich der Fahrzeug-Laufwerkrollen eine blanke, glänzende Oberfläche und gegenüberliegend ein rostbrauner, normaler Korrosionszustand mit fettartigen Ablagerungen. Farbpigmente des Fahrzeuglaufwerkes sowie übermäßiger Verschleiss konnten an der Seiloberfläche nicht gefunden werden. Allerdings waren am Rand des Kontaktbereiches der Fahrzeug-Laufwerkrollen sowohl am intakten

Fig. 5: Friction marks on the surface of the deflection shoe of support cable B

Bild 5: Reibspuren auf der Oberfläche des Ablenkschuhs von Tragseil B

as well as on the broken profile wires, friction marks with scale-like build-ups could be discerned (Fig. 4). These friction marks of unknown origin could be found at all wire break locations.

Considerable friction marks were also found in rope direction at the four guide grooves of the top station. Bare spots in these areas indicate a high surface pressure (Fig. 5). About 60 m from the top station, the three support cables A, C, and D still intact were also characterized by areas with friction marks and scale-like build-ups.

Investigations on the car's running gear did not reveal any indications that the running gear or parts of it were getting in contact with the support cable or its profile wires.

5.2 Fractographic Analyses

With one exception (fatigue crack), the fracture surfaces of the examined wires of support cable B are characterized by macroscopic features of overload fractures where the crack always initiated at grooves, corrosion pits, or scale-like build-ups on the wire surface (Fig. 6). The scanning electron microscope analysis of the fracture surface (Fig. 7) revealed four typical fracture zones:

- Zone 1 with a depth of 200–300 µm designates the crack initiation point (finely structured intergranular surface of the overload fracture's surface covered with corrosion products);

Seilabschnitt wie auch an den gebrochenen Profildrähten Reibspuren mit schuppenartigen Auftragungen erkennbar (Bild 4). Diese Reibspuren unbekannter Herkunft waren bei allen Drahtbruchstellen zu finden.

Erhebliche Reibspuren in Seilrichtung wurden auch bei den vier Führungsritzen der Bergstation gefunden. Blanke Stellen in diesen Bereichen deuten auf hohe Flächenpressung hin (Bild 5). Die drei noch intakten Tragseile A, C und D enthielten ebenfalls Bereiche mit Reibspuren und schuppenartigen Auftragungen ebenfalls ca. 60 m ausserhalb der Bergstation.

Untersuchungen am Fahrzeug-Laufwerk ergaben keine Hinweise darauf, dass das Fahrwerk oder Teile davon mit dem Tragseil oder deren Profildrähten in Berührung gekommen wären.

5.2 Fraktographische Analysen

Mit einer Ausnahme (Ermüdungsanriss) zeigten die Bruchflächen der untersuchten Drähte von Tragseil B makroskopische Merkmale von Gewaltbrüchen, stets mit Rissausgang bei Riefen, Korrosionsnarben oder schuppenartigen Auftragungen an der Draht-Aussenseite (Bild 6). Die Bruchflächenanalyse im Rasterelektronenmikroskop (Bild 7) ergab vier typische Bruchzonen:

- Zone 1 mit einer Tiefe von 200–300 µm bezeichnet die Bruchausgangsstelle (fein strukturierte, interkristalline Gewaltbruchfläche mit Korrosionsprodukten belegt);

Fig. 6: Wire surface in the fracture area with grooves, scale-like build-ups, and corrosion products

Bild 6: Drahtoberfläche im Bruchbereich mit Riefen, schuppenartigen Auftragungen und Korrosionsprodukten

Fig. 7: Typical appearance of the wire fracture surfaces

Bild 7: Typische Ausbildung der Draht-Bruchflächen

- Zone 2 is characterized by an intergranular fracture with partially wide open grain boundaries and a depth of a maximum of 700 µm (Fig. 10);
- Zone 3 is characterized by a micro-ductile overload fracture with fine dimples and isolated cleavage planes (Fig. 11);
- Zone 4 is characterized by shear lips.

The fracture surfaces in zone 3 and zone 4 were not corroded. Hence, they formed only recently.

5.3 Metallographic Analyses

Longitudinal sections across the fracture surfaces parallel to the wire axis of four different wires consistently revealed numerous secondary cracks with a depth of 200 to 300 µm. They preferentially formed at corrosion pits and below scale-like build-ups (Fig. 8). In addition to that, areas with friction martensite as well as heat affected zones could be identified below these build-ups (Fig. 9). Microsections of wires of the support cables A, C, and D from areas exhibiting friction marks and scale-like build-ups are also characterized by incipient cracks such as in support cable B (Fig. 8). However, they had a depth of only approx. 100 µm.

- Zone 2 zeigt einen interkristallinen Bruch mit teilweise klaffenden Korngrenzen und einer Tiefe von maximal 700 µm (Bild 10);
- Zone 3 weist die Struktur eines mikroduktilen Gewaltbruches mit feinen Waben und vereinzelt ausgebildeten Spaltflächen auf (Bild 11);
- Zone 4 zeigt ausgebildete Scherlippen.

Die Bruchflächen in Zone 3 und Zone 4 waren nicht korrodiert und folglich erst vor kurzer Zeit entstanden.

5.3 Metallografische Analysen

Längsschliffe durch die Bruchflächen parallel zur Drahtachse an vier verschiedenen Drähten ergaben übereinstimmend zahlreiche Nebenrisse mit einer Tiefe von 200 bis 300 µm. Diese entstanden bevorzugt an Korrosionsnarben und unter schuppenartigen Auftragungen (Bild 8). Unter diesen Auftragungen (Bild 9) konnten zudem Bereiche mit Reibmartensit sowie Wärmeeinflusszonen identifiziert werden. Mikroschliffe an Drähten der Tragseile A, C und D aus Bereichen mit Reibspuren und schuppenartigen Auftragungen zeigten ebenfalls Anrisse wie bei Tragseil B (Bild 8), allerdings mit geringerer Tiefe von lediglich ca. 100 µm.

Fig. 8: Foreign material scale exhibiting secondary cracks

Bild 8: Fremdmaterialschuppe mit Nebenrisse

5.4 Micro Area Analysis

In order to clarify the origin of these scale-like build-ups, energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX) and wavelength-dispersive X-Ray spectroscopy (WDX) analyses were performed on the wire, the scales, and the deflection shoe material of the top station.

Differences were found between the wire and the scale material with respect to the carbon and silicon content (wire: approx. 0.6 % C and 0.3 % Si; scale: approx. 0.2 % C,

Fig. 10: Intergranular overload fracture with wide open grain boundaries (zone 2)

Bild 10: Interkristalliner Gewaltbruch mit klaffenden Korngrenzen (Zone 2)

Fig. 9: Foreign material scale with cavity

Bild 9: Fremdmaterialschuppe mit Hohlraum

5.4 Mikrobereichsanalysen

Um die Herkunft dieser schuppenartigen Auftragungen abzuklären, wurden Analysen mittels energiedispersiver Röntgenanalytik (EDX) und mit wellenlängendispersiver Röntgenanalytik (WDX) am Draht-, Schuppen- und Ablenkschuh-Werkstoff der Bergstation durchgeführt.

Es zeigten sich Unterschiede zwischen Draht- und Schuppenwerkstoff bezüglich Kohlenstoff- und Siliziumgehalt (Draht: ca. 0.6 % C und 0.3 % Si; Schuppe: ca. 0.2 % C, Si nicht

Fig. 11: Micro-ductile overload fracture with fine dimples (zone 3)

Bild 11: Mikroduktiler Gewaltbruch mit feinen Waben (Zone 3)

Si below limit of detection). Hence, the wire and scale material were not identical. However, the results of both the analyses of the scale (Fig. 9) and the deflection shoe material (Fig. 5) are in agreement.

5.5 Chemical Analyses

Several chemical analyses were performed aiming at determining the corrosive potential of the used lubricating grease as well as of the deposits present on the support cable's surface.

Based on these analyses, the corrosion potential of these substances as well as of the support cable environment can be rated as low.

5.6 Mechanical Testing of the Wire

Mechanical testing (tensile tests, tests with bending back and forth, twisting tests) of profile wires from the damaged area with and without friction marks as well as of intact reference wires from the upper anchoring area did not reveal any negative influence of the corrosion condition on the mechanical parameters. However, for the samples exhibiting friction marks and scale-like build-ups, the values obtained were partially considerably lower than those of the reference wires.

6. Cause of the Damage

All fracture surfaces (except for those exhibiting fatigue striations) showed features of an intergranular overload fracture in zone 2 (Fig. 10) and of a micro-ductile overload fracture in zone 3 (Fig. 11). As experience shows, the intergranular cracks identified during the fractographic examination (Fig. 10) are rare for the used profile wire material ($R_m = 1600$ MPa) and only occur in cases of heat treatment errors and/or as a result of hydrogen embrittlement. The intergranular incipient cracks found reached considerably deeper into the wire material than the friction martensite zones. Hence, hardening cracks could be excluded. Therefore, hydrogen embrittlement was moved into the focus as probable cause. Hydrogen

nachweisbar). Draht- und Schuppenwerkstoff waren folglich nicht identisch. Dagegen stimmten die Analyseergebnisse von Schuppen- (Bild 9) und Ablenkschuhwerkstoff (Bild 5) überein.

5.5 Chemische Analysen

Mehrere chemische Analyseverfahren hatten zum Ziel, das korrosive Potential der verwendeten Schmierfette sowie der an der Tragseiloberfläche vorhandenen Ablagerungen zu bestimmen.

Die Analysen ergaben, dass das Korrosionspotential dieser Substanzen sowie der Tragseilumgebung als mild zu bewerten ist.

5.6 Mechanische Drahtprüfungen

Mechanische Prüfungen (Zugversuche, Hin- und Herbiegeversuche, Verwindversuche) an Profildrähten aus dem Schadensbereich mit und ohne Reibspuren sowie an intakten Referenzdrähten aus dem oberen Verankerungsbereich ergaben keine negative Beeinflussung der mechanischen Kennwerte durch den Korrosionszustand. Die Proben mit Reibspuren und schuppenartigen Auftragungen ergaben allerdings Kennwerte, die teilweise erheblich unterhalb derjenigen der Referenzdrähte lagen.

6. Schadensursache

Alle Bruchflächen (ausgenommen diejenige mit Ermüdungsschwingstreifen) zeigten Merkmale eines interkristallinen Gewaltbruches in Zone 2 (Bild 10) und eines mikroduktilen Gewaltbruches in Zone 3 (Bild 11). Die bei der fraktografischen Untersuchung festgestellten interkristallinen Risse (Bild 10) treten beim verwendeten Profildrahtwerkstoff ($R_m = 1600$ MPa) erfahrungsgemäß selten und nur bei Wärmebehandlungsfehlern und/oder infolge von Wasserstoffversprödung auf. Härterisse konnten ausgeschlossen werden, da die gefundenen, interkristallinen Anrisse erheblich tiefer in den Drahtwerkstoff reichten als die Reibmartensitzonen. Als wahrscheinliche Ursache rückte daher eine Wasserstoffversprödung in den Vordergrund. Wasserstoff aus

from metallurgical or galvanic processes could be excluded, as no relevant indications could be found. Thus, diffusible hydrogen remained as potential cause of the crack. It forms during corrosion processes in the absence of oxygen.

7. Reconstruction of the Damage Progression

During the first, jerky, cable shift in 1979 (according to the cable car personnel), a local heat- and/or deformation-induced martensite formation at the support cable surface as well as material transfer ("scales") due to local seizing occurred between the support cable and the deflection shoe in the top station owing to high surface pressure and insufficient lubrication. In the absence of oxygen below material build-ups and due to the permanent static tensile stresses in the support cable, the conditions for hydrogen induced stress corrosion could develop. Owing to the mild environment, the crack growth process took around 25 years, before the first wire broke due to exceeding the critical crack length. The redistribution of the load to adjacent wires which were also already weakened resulted in a chain reaction during which all profile wires broke in the friction-damaged area. It is thanks to the sufficient strength of the round wires of the cable remaining intact that the support cable did not break catastrophically.

References / Literatur

- [1] Piskoty, G.; Zraggen, M.; Michel, S.; Rössler, G.; Faller, M.; Oplatka, G.: Abklärung der Ursachen eines Tragseilschadens, Empa-Bericht Nr. 437392, Dübendorf, Schweiz, 2005
- [2] Zraggen, M.; Piskoty, G.; Faller, M.; Kovacs, G.; Rössler, G.; Michel, S.; Oplatka, G.; v. Trzebiatowski, O.: Analysis of track rope damage in serious incident on Schilthorn aerial ropeway, *Materials and Corrosion*, 57 (2006) 7, 549–554
- [3] Piskoty, G.; Zraggen, M.; Weisse, B.; Affolter, Chr.; Terrasi, G.: Structural failures of rope-based systems, *Engineering Failure Analysis*, 16 (2009), 1929–1939
DOI: 10.1016/j.engfailanal.2008.10.004
- [4] Broichhausen, J.: *Schadenskunde*, Carl Hanser Verlag, München, Deutschland, 1985
- [5] Lange, G.; Pohl, M.: *Systematische Beurteilung technischer Schadensfälle*, 5. Auflage, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Deutschland, 2001

metallurgischen oder galvanischen Prozessen konnte ausgeschlossen werden, da keine Hinweise darauf gefunden wurden. Somit verblieb diffusionsfähiger Wasserstoff als potenzieller Rissauslöser. Dieser entsteht bei Korrosionsprozessen unter Sauerstoffabschluss.

7. Rekonstruktion des Schadensverlaufes

Während der ersten, gemäss Bahnpersonal ruckartig erfolgten Seilverschiebung im Jahre 1979 kam es zwischen Tragseil und Ablenkschuh in der Bergstation durch hohe Flächenpressung und mangelhafte Schmierung zu lokaler wärme- und/oder verformungsinduzierter Martensitbildung an der Tragseiloberfläche sowie zu Materialübertrag („Schuppen“) infolge örtlicher Verschweißungen. Unter Sauerstoffabschluss unterhalb von Materialauftragungen und durch die permanente, statische Zugspannung im Tragseil ergaben sich Bedingungen für eine wasserstoffinduzierte Spannungsrisskorrosion. Durch die milde korrosive Umgebung dauerte der Risswachstumsprozess rund 25 Jahre, ehe der erste Draht durch Überschreitung der kritischen Risslänge brach. Infolge Lastumlagerung auf benachbarte, ebenfalls bereits geschwächte Drähte kam es zu einer Kettenreaktion, während der alle Profildrähte im reibgeschädigten Bereich brachen. Dass das Tragseil nicht katastrophal riss, ist der ausreichenden Restfestigkeit der intakt gebliebenen Runddrähte des Seiles zu verdanken.

- [6] VDI-Richtlinien 3822, Schadensanalyse, Beuth-Verlag, Berlin, Deutschland, 1984
- [7] Uhlig W.: Schadensanalyse, VEB-Verlag Technik, Berlin, Deutschland, 1986

Roland E. Koller

born on December 4th, 1957 in Bern, Switzerland degreed at the Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zürich as a mechanical engineer. After acquiring practical experiences as a rocket scientist he joined the Swiss

Federal Laboratories for Material Science and Technology (Empa). Currently he is head of the durability lab and lecturer at ETH.

Bibliography

DOI 10.3139/147.110429
Pract. Metallogr. 53 (2016) 11; page 696–710
© Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG
ISSN 0032–678X

Gabor Piskoty

born on August 22nd, 1966 in Budapest, Hungary, degreed at the TU-Budapest (BME) as a mechanical engineer. He wrote his PhD thesis about rope derailment of monocable ropeways at the Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zürich. Since

1999 he is a failure analyst at the Empa, Dübendorf (CH).

COMPUTER | KUNSTSTOFFE | TECHNIK | WIRTSCHAFT

HANSER

Lernen Sie aus den Fehlern anderer!

Das Handbuch bietet Ihnen eine Zusammenstellung von mehr als 60 Original-Schadensfällen.

- ✓ Ursachen, Abhilfemaßnahmen, Prävention
- ✓ Exzellente optische Vergleichsmöglichkeiten
- ✓ Detaillierte Tabellen der Werkstoffe
- ✓ Schnelle Einordnung von Schadensfällen durch umfangreichen REM-Bildatlas

Neidel u.a.
Handbuch Metallschäden
ISBN 978-3-446-42775-4 · € 249,-

Weitere Informationen und Bestellmöglichkeit im Internet unter www.hanser-fachbuch.de

Carl Hanser Verlag · Kolbergerstraße 22 · 81679 München · Fax +49 89 99830-157 · www.hanser-fachbuch.de