

**Rekonstruktion des Schadenfalles
an der Schilthornbahn**

Gabor Piskoty / Markus Zraggen / Gabor Kovacs
Gerd Rössler / Silvain Michel / Markus Fallner

externer Fachberater: Gabor Oplatka
Drahtprüfung: Fa. Baremo

EMPA

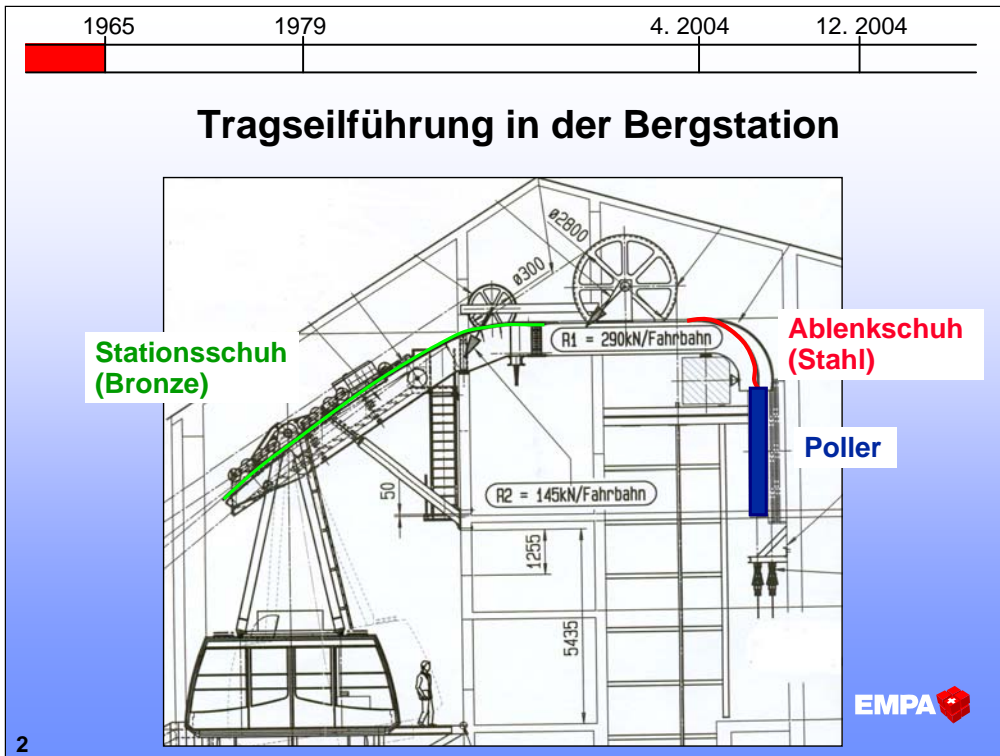
1

DER TEXT IST TEILWEISE STICHWORTARTIG. DIE FOLIENBESCHRIFTUNGEN WERDEN AUF ENGLISH UEBERSETZT. ES KOMMEN NOCH 1-2 WEITERE FOLIEN DAZU, ABER OHNE NEUEN FACHAUSDRUECKEN. UNKLARHEITEN BITTE MELDEN AN gabor.piskoty@empa.ch DANKE! Mit freundlichen Grüßen Gabor Piskoty.

Der Vortrag orientiert sich nicht am zeitlichen Ablauf der Untersuchung sondern am zeitlichen Ablauf des Schadenfalles.

Wir werden die einzelnen Meilensteine beginnend mit der Erstellung der Bahn bis zum Schadenseintritt im Zeitraffer durchgehen. Bei jedem Meilenstein werde ich die Untersuchungsergebnisse erwähnen, auf die sich die einzelnen Fakten abstützen. Dabei muss ich mich aus Zeitgründen auf das Wesentliche beschränken.

Im Oberen Bereich jeder Folie sehen sie eine Zeitskala. So sehen Sie immer die aktuelle Zeit unserer "Zeitreise".



Wir sollten kurz die Tragseilführung in der Bergstation betrachten, da sie eine zentrale Rolle beim Schadenfall spielte. Das Tragseil wird über den Stationsschuh zum Ablenkschuh geführt. Hier wird das Tragseil um 90 Grad, in Richtung Poller abgelenkt. Am Poller wird das Tragseil verankert.

1965 1979 4. 2004 12. 2004



 **1: Entstehung von Fressspuren
bei der ersten Seilverschiebung um 25 m**




Material-Auftrag (Schuppen)

38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50

3

Jetzt überspringen wir 12 Jahre und befinden uns im Jahr 1979. In diesem Jahr wurde die erste Tragseilverschiebung durchgeführt. Dabei sind Fressspuren auf der Seiloberfläche entstanden, und zwar im Bereich, wo später die Profildrähte gebrochen sind. Woher können wir dies wissen?

1965 1979 4. 2004 12. 2004

 **Reibpartner: Ablenkschuh**





Foto: 2005

Foto: 2005

EMPA 

4

Bei der Erstellung der Anlage lag die spätere Schadenstelle auf dem Ablenkschuh. Dies konnte anhand der protokollierten Seilverschiebungen rekonstruiert werden.

Wenn wir die Rille dieses Ablenkschuhes näher betrachten, erkennen wird, dass es eine unregelmässige Oberfläche mit Fressspuren hat . Es gibt Bereiche, wo das Seil praktisch nicht auflag, in anderen Bereichen gab es nur im Rillengrund Kontakt zwischen dem Ablenkschuh und dem Tragseil.

1965 1979 4. 2004 12. 2004



 **Spurenvergleich Ablenkschuh / Draht
betreffend Topologie**




Foto: Bestandsaufnahme 2005 

5

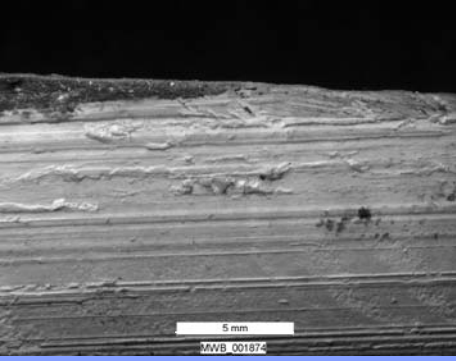
Um festzustellen, ob die Fressspuren am Tragseil tatsächlich vom Ablenkschuh stammen, wurden die Topologie der Spuren am Seil und jene am Ablenkschuh miteinander verglichen. Dafür wurde zuerst ein Kunststoffabguss angefertigt.

1965 1979 4. 2004 12. 2004

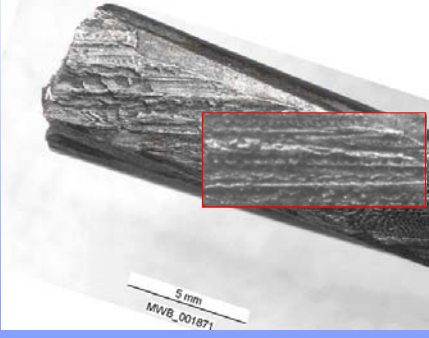



Spurenvergleich Ablenkschuh / Seil betreffend Topologie

Abguss der Rille (Negativabdruck)



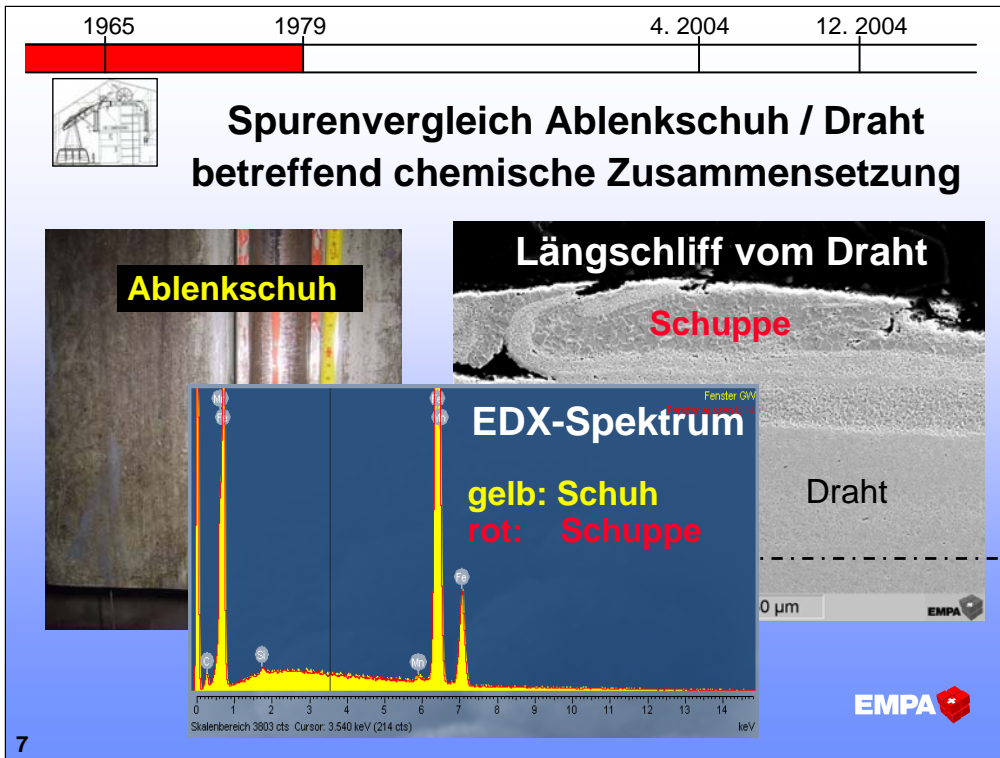
Fressspur am Profildraht



EMPA 

6

Hier sehen Sie einen Vergleich der Oberfläche des Rillenabgusses und eines Profildrahtes. Wenn man die beiden Bilder übereinander legt, bleiben kaum Zweifel offen, dass der Fressvorgang zwischen Ablenkschuh und Tragseil abgelaufen ist.



Dieser Befund wurde mit einer chemischen Analyse des Ablenkschuhes und der Schuppen an der Seiloberfläche weiter überprüft.

Wie Sie erkennen können: Die beiden Materialien sind identisch. Somit steht als Reibpartner definitiv der Ablenkschuh fest.

Auch die WDX-Methode kam zum Einsatz, und bestätigte diesen Befund.

1965 1979 4. 2004 12. 2004

2: Fortschreitende Spannungsrisskorrosion (SpRK)

Fressspur (Schuppe)

Einbettmaterial

Profildraht (Längsschliff)

Mikrorisse

200 µm
MWA_006473

EMPA

8

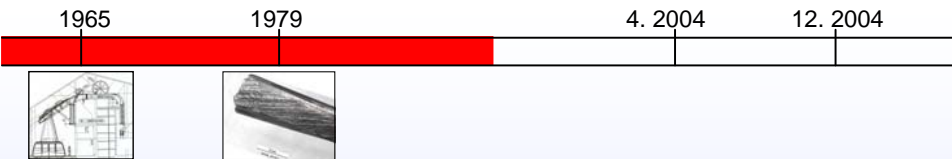
Im Bereich der Fressspuren begann ein langsamer Schädigungsprozess der Profildrähte durch wasserstoffinduzierte Spannungsrisskorrosion.

Dabei entstanden immer tiefere Mikrorisse an der Seiloberfläche, die jedoch vorerst noch nicht zu Drahtbrüchen führten.

Worauf basiert diese Behauptung? *Erstens* zeigen die gefundenen Mikrorisse typischen Merkmale für Spannungsrisskorrosion. (Verästelung)


Zweitens?

1965 1979 4. 2004 12. 2004




Weitere Hinweise für H-induzierte SpRK (Fraktografie)

- makroskopisch verformungsarme Gewaltbrüche
- interkristalliner Rissverlauf
- ein einziger Ermüdungsanriss bei 82 untersuchten Bruchflächen

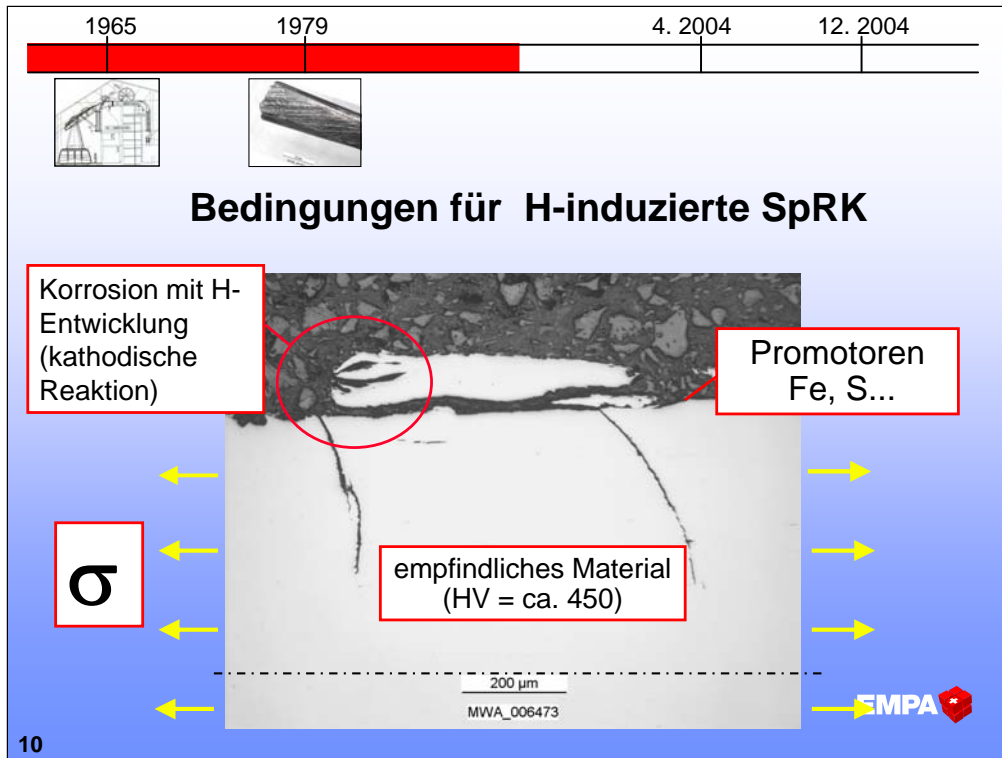


Mag = 20 X (bezogen auf 9x12cm) Signal A = SE1
File Name = SEM_012076.tif EHT = 20.00 kV

EMPA 

9

Weitere Indizien für Spannungsrisskorrosion. (zweitens, drittens....)



Warum gab es Spannungsrisskorrosion nur im Bereich von Schuppen?
Lösung: ALLE Bedingungen für wasserstoffinduzierte Spannungsrisskorrosion waren unterhalb der Fressspuren vorhanden.

Die Bedingungen sind:

- Ein für Spannungsrisskorrosion empfindliches Material, wobei Werkstoffe ab einer Härte von 250 Vickers grundsätzlich gefährdet sind. Die Profildrähte haben eine wesentlich höhere Härte als 250 Vickers. Diese Bedingung ist erfüllt.
- Mechanische Spannung, die bei gespannten Tragseilen immer vorhanden sind.
- Und Promotoren, anders gesagt: Katalysatoren, die bei Tragseildrähten immer vorhanden sind (Fe).
- Korrosionsprozess mit Wasserstoffentwicklung (Spaltbedingung, Korrosion unter Luftabschluss) – Dies ist nur unter Schuppen erfüllt.

1965 1979 4. 2004 12. 2004

1965 1979 4. 2004 12. 2004

3: Letzte magnetinduktive Prüfung

Damals noch
KEINE Drahtbrüche!

Frische Drahtbruchflächen!

200µm Mag = 20 X (bezogen auf 9x12cm) Signal A = SE1
File Name = SEM_012076.tif EHT = 20.00 kV

11

Bei der letzten magnetinduktiven Prüfung, die etwa ein halbes Jahr vor dem Schadensereignis durchgeführt worden war, waren noch keine Drahtbrüche vorhanden. Somit ist der Prüfbefund als absolut korrekt zu bezeichnen.

Woher wissen wir das? Frische Drahtbruchflächen!

1965 1979 4. 2004 12. 2004



**4: Kritische Risstiefe erreicht –
einzelne Spontanbrüche (Sprödbrüche)**



EMPA

12

Nachdem die Kritische Risstiefe erreicht worden war, sind einzelne Spontanbrüche (Sprödbrüche) entstanden.

1965 1979 4. 2004 12. 2004

Bruchmechanische Analyse

PARAMETER

- Anrisstiefe: 0.7 mm
- Spannung: 480 MPa

↓

Spannungsintensitätsfaktor:

$$K_{IC} = 25 \text{ MPa} \cdot \sqrt{m}$$

?

Bruchzähigkeit < $25 \text{ MPa} \cdot \sqrt{m}$

Spontanbruch ist realistisch

EMPA

13

Der Schadensprozess blieb unentdeckt und konnte mit zunehmender Geschwindigkeit fortschreiten.


Mit der Zeit haben einige Anrisse eine kritische Länge erreicht, bei der die Drähte spontan, d.h. durch die wirkenden statischen Belastungen, brachen (Sprödbruch).

Dies konnte mit einer bruchmechanischen Analyse nachgewiesen werden. Bei dieser Berechnung wurde eine Anrisstiefe von 0.7 mm angenommen, die etwa dem grössten interkristallinen Bereich an den Drahtbruchflächen entspricht.


Die Berechnung lieferte eine Spannungsintensität von rund 25 . Die Bruchzähigkeit des Drahtmaterials ist höchstwahrscheinlich kleiner (Literaturangabe für den Werkstoff Ck100 liegt im bereich von 13-20).


Dies könnte noch versuchstechnisch erhärtet werden. Aber heute können wir sagen, dass die Annahme eines Spontanbruches realistisch ist.

1965 1979 4. 2004 12. 2004



5: Entstehung von Drahtbruchnestern



EMPA 

14

Wegen den Schleifspuren war die Verteilung von Drahtbrüchen entlang der Seilachse nicht zufällig, wie dies bei einer homogenen Seiloberfläche der Fall ist. Wie Sie sehen, erstrecken sich die Schleifspuren über mehrere Profildrähte, was die Entstehung von Drahtbruchnestern (Ansammlungen von Drahtbrüchen) begünstigte.

1965 1979 4. 2004 12. 2004

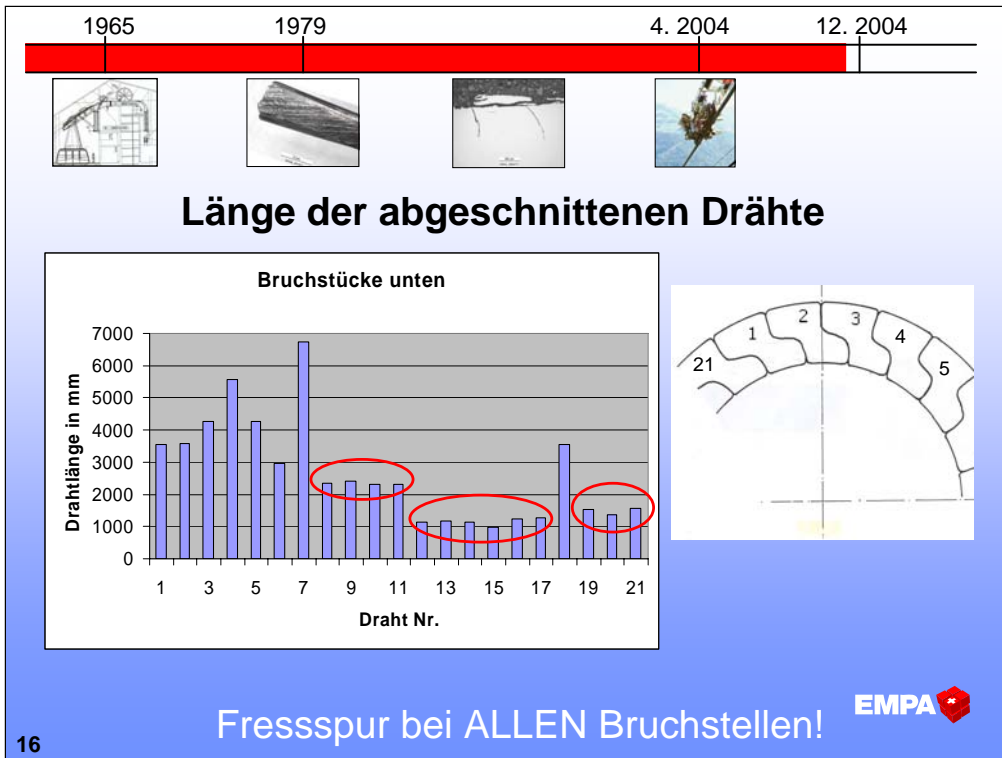
Rekonstruierung der Lage der Drahtbruchstellen

Referenzquerschnitt Drahtabschnitt Waage

EMPA

15

Um die Existenz von Drahtbruchnestern nachzuweisen, wurde die relative Lage der Bruchstellen im Seilverbund rekonstruiert. Der Drahtbesen wurde abgebunden und die Drähte abgeschnitten und anschliessend mit einer Präzisionswaage abgewogen. Die sich ergebende Verteilung der Bruchstellen zeigt das nächste Diagramm.



Es ist ersichtlich, dass sehr viele Bruchstellen exakt nebeneinander liegen.

1965 1979 4. 2004 12. 2004

6: Austreten von Profildrähten aus dem Seilverbund → Torsionsbewegung

plastische Verformung

Endhaken bei 550 mm

EMPA

17

Nachdem etwa 3-4 Drahtbrüche nebeneinander entstanden waren, traten die gebrochenen Profildrähte vom Seilverbund aus. Dies führte zur Zerstörung des ursprüngliches Torsionsgleichgewichtes im Seil und löste heftige Torsionsbewegungen aus.

Bei vielen Drähten kann man im Stammbereich eine markante plastische Verformung erkennen (Torsion). 9 Drähte stehen rechtwinklig ab, und haben einen Endhaken. Der Abstand der Endhaken von der Seilachse ist gleich gross wie der Abstand der beiden Tragseile von Fahrbahn 1. Dies ist ein Indiz dafür, dass diese Drähte beim Rotieren auf das Nachbarseil aufschlugen.

1965 1979 4. 2004 12. 2004

Messung der Torsionsbewegung des Restseiles

Foto: Bestandsaufnahme, 2005

18

Auf eine Torsionsbewegung des Tragseiles deutet auch die Verdrehung des Restseiles bei der Entlastung hin. Dies wurde bei der Demontage des beschädigten Tragseiles mit einer aufgehängten Schnur gemessen, die vor der Entlastung aufgehängt wurde.

Sie können Erkennen, dass sich das Restseil bei der Entlastung etwa 3 mal um die eigene Achse gedreht hat.

1965 1979 4. 2004 12. 2004


7: Kettenreaktion – Bruch aller Profildrähte
 Verwindeversuch (Fa. Baremo)

19


Im weiteren Verlauf brachen in einer Kettenreaktion alle Profildrähte. Wie brüchig die durch Spannungsrisskorrosion geschwächten Profildrähte waren, konnte mit mechanischen Prüfungen gezeigt werden. Die Zug-, Biege- und Torsionsversuche wurden von der Fa. Baremo durchgeführt.

Oben sehen Sie einen Referenzdraht ohne Fressspuren nach der Torsionsprüfung. Darunter können Sie die drastische Abnahme der möglichen Verwindungen bei dem Prüfling mit Fressspur erkennen. Ähnliche Resultate ergaben alle drei Versuchsarten.


1965 1979 4. 2004 12. 2004



Doppelbruchstück im Schnee



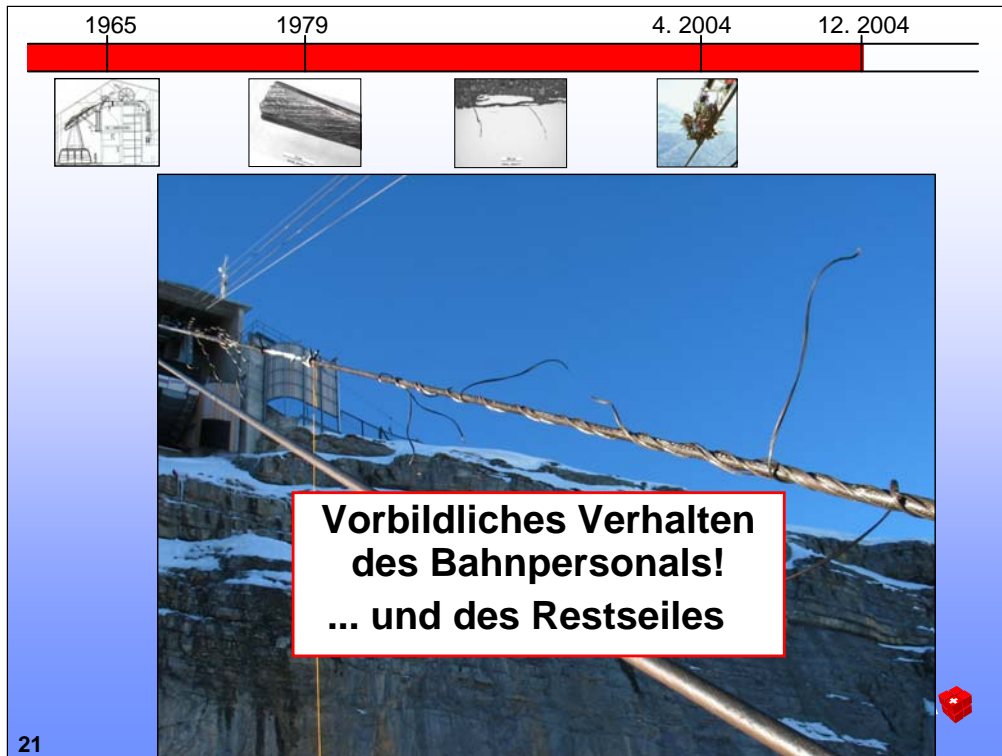
**20 Doppelbruchstücke wurden gefunden.
Alle hatten Fressspuren an beiden Enden!**

EMPA 

20

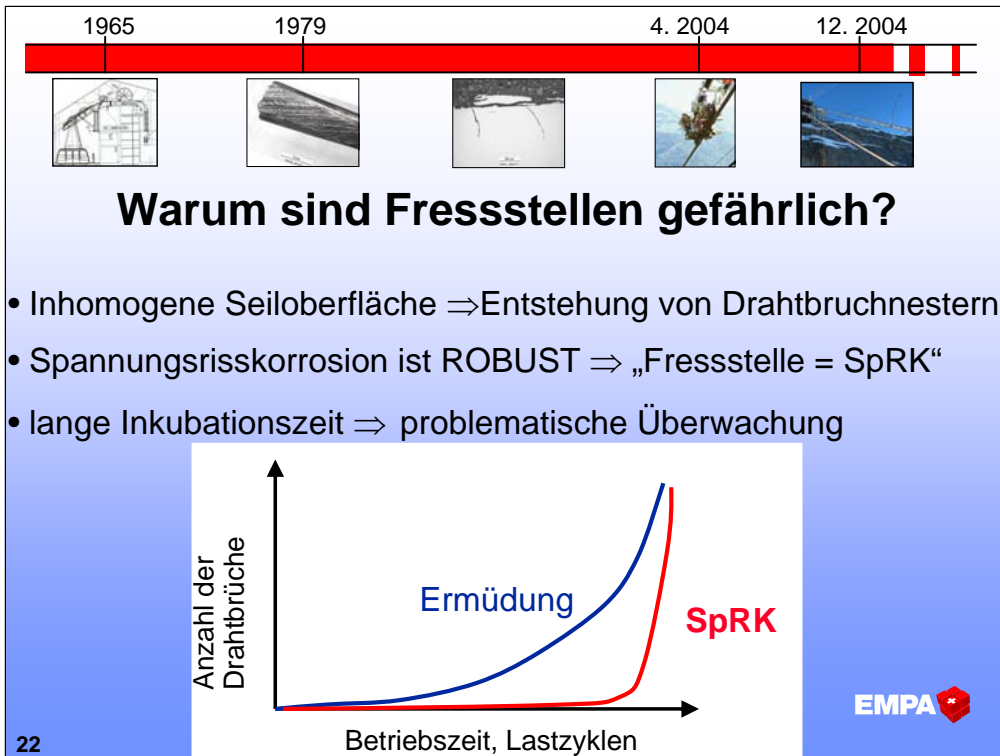
Auf die Brüchigkeit des Seiles deuten die vielen Drahtstücke mit Doppelbruch hin, die im Schnee gefunden wurden.

(=> Spröbruch ähnlich wie bei Spaghettis!!)



So sind wir am Ende des Schadensablaufes angekommen. Die richtige Reaktion des Bahnpersonals hat wesentlich dazu beigetragen, dass aus dem Schadenfall kein Unfall geworden ist.

- nachgehen, woher das ungewöhnliche Knallgeräusch kam
- Fangbremse nicht aktiviert und
- Evakuierung mit Helikopter



Warum sanieren? Warum genügt es nicht zu überwachen?

Bei 3 von 4 Seilen wurden Anrisse detektiert, trotz milder korrosiver Umgebung!

Die Inkubationszeit bis zum Entstehen der Brüche ist sehr lange – danach rasante Entwicklung

1965 1979 4. 2004 12. 2004

The timeline shows five stages of crack detection: 1965 (schematic of a bridge), 1979 (close-up of a crack), 4. 2004 (crack on a concrete surface), and 12. 2004 (crack on a concrete surface). The 12. 2004 stage is highlighted with a red and white striped bar.

Detektion von Anrissen (lokal)

Two microscopic images of concrete surfaces showing cracks. The left image shows a crack with a scale bar of 2000 µm. The right image shows several vertical cracks with a scale bar of 2000 µm.

Forschungsbedarf!

EMPA

23

Die Anrisse sind mit Magnetspulverprüfung detektierbar.

HERZLICHEN DANK !

Herren Markus Beer, Walter Kobelt (UUS)
Herren Peter Feuz und Ruedi Lauri (Schilthornbahn AG)
Herren Urs Amiet und Kurt Rufer (BAV)
Herren Bruno Longatti, Walter Züst (Fa. Fatzer)
Herr Peter Volmer (Seilbahnen Schweiz)
Herren Erwin Baumgartner, Christoph Baumgartner und
ChristianENZler (Fa. Baremo)
Herren Peter Baumann, Moser Niklaus, (Fa. Garaventa)
Herr August Haller (Haller GmbH)
Herr Reto Canale (IKSS)
Herren Stefan Messmer, Ernst Moor, Walter Ottiger,
Rene Weber und Theo Wenger (Fa. IWM)
Herr Georg Kopanakis
Herren Gaston Latscha, Herr Denzler, Roland Stöckli
und Herr Haldenstein (National Versicherung)
Herr Martin Haldenstein (Kessler & CO AG) 

24

Leute, die beigetragen haben.

1965 1979 4. 2004 12. 2004



Unterschiedliche Drahtbruchbesen oben / unten



Asymmetrien

- elastische Länge
- Drehrichtung Restseil
- Drahtkopf
- Bahnneigung

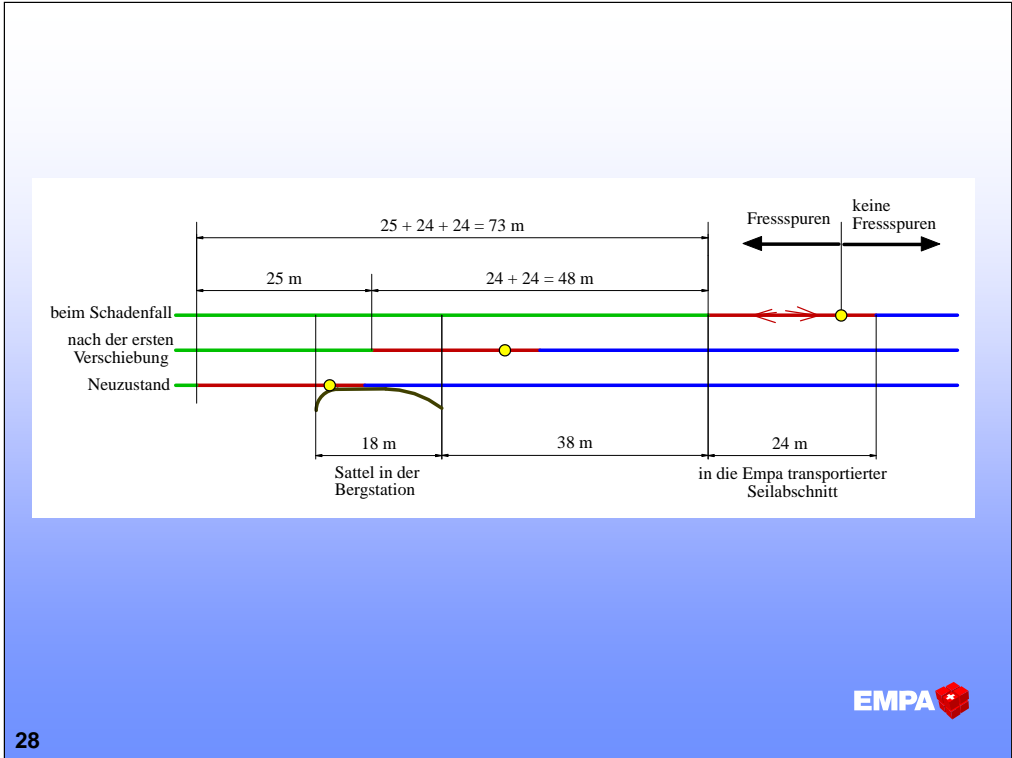
EMPA 

25

Ab hier RESERVE Folien, ohne vorbereiteter Text.










1965 1979 4. 2004 12. 2004




Gedanken zur Vermeidung ähnlicher Vorfälle

- Vermeidung von Fressvorgängen
- finden und sanieren von bestehenden Fressstellen

↓

„Schulungskoffer“

EMPA 

30

Zum Schluss noch ein paar Gedanken zur Vermeidung ähnlicher Vorfälle. Vermeidung nicht nur bei Seilverschiebung, auch im Falle von Arbeiten mit Klemmplatten usw.



Schadensablauf im mehreren Phasen

Die Seilbahnanlage



Foto: Schilthornbahn AG

Einige Parameter

- 2 Tragseile pro Fahrbahn
- 1x vollverschlossene Tragseile
- Nenndurchmesser: 40 mm

Wasserstoffinduzierte Spannungsrisskorrosion

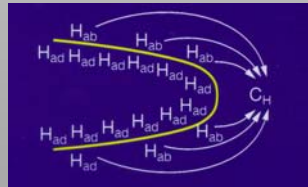
Voraussetzungen:

- Korrosion mit H-Entwicklung (kathodische Reaktion)
- Empfindlicher Werkstoffzustand (Härte > ca. 245 HV)
- Spannungen

Mechanismus:



Promotoren: S, As, Sb, Fe



EMPA 