



Faserseile in der Montage von Seilbahnen

Konstantin Kühner, IFT Universität Stuttgart

Urs Schneider, Jakob AG Trubschachen

Fredy von Moos, Garaventa AG Goldau

Einführung

Seilbahnen stellen seit über hundert Jahren in der Personen- und Materialfördertechnik eine sowohl wirtschaftliche als auch technisch faszinierende Lösung dar, größere Distanzen und Höhenunterschiede sowie unwegsames Gelände mit verhältnismäßig wenig Bausubstanz zu überbrücken. Die eingesetzten Stahlseile können mit Drahtnenntfestigkeiten bis zu 2160 N/mm^2 [1], [2], [3] bei verhältnismäßig geringem Eigengewicht hohe Lasten übertragen und benötigen nur wenige, schlanke Tragstrukturen. Insbesondere mehrseilige Systeme wie Zweiseilpendelbahnen, Zwei- und Dreiseilumlaufbahnen erlauben bei guter Stabilität gegen Seitenwind große Stützenabstände, so dass diese Bahnen meist beeindruckende Anlagencharakteristiken aufweisen.

Als Beispiel sei die 1963 eröffnete Pendelbahn vom Eibsee bei Garmisch-Partenkirchen auf den Zugspitzgipfel genannt, die mit einer Streckenlänge von 4,5km und einem Höhenunterschied von fast 2,0km mit nur zwei Stützen in einer Sektion auskommt und somit noch heute eines der anspruchsvollsten Streckenprofile im weltweiten Vergleich aufweist, vgl. Abbildung 1. Die aktuell im Bau befindliche Nachfolganlage wird mit nur einer Stütze von 127m Höhe auskommen.



Abbildung 1: Eibseebahn von Grainau zur Zugspitze
(Länge: 4500 m / Höhenunterschied: 2000 m)

Bei der Montage einer Seilbahn liegen komplexe, zum Teil spektakuläre Baustellenverhältnisse vor. Einer der wichtigsten Schritte ist dabei die Herstellung der ersten Seilverbindung zwischen Tal- und Bergstation und der anschließende Seilzug. Während man um die Jahrhundertwende das schwere Tragseil auf dem Rücken von Eseln oder durch Muskelkraft der Bauarbeiter zu Berg trug, wurde beim Bau der Eibseeseilbahn zum Beispiel ein erstes, dünnes Vorseil von Mitgliedern der Bergwacht die Felswand hinuntergezogen (vgl. Abbildung 1). Auch wenn diese Arbeit heute meist Hubschrauber übernehmen, ist die Methode, mit mehreren Vorseilen steigenden Durchmessers eine Verbindung von

ausreichender Tragkraft für das Hauptseil der Bahn herzustellen, Stand der Technik (vgl. **Error! Reference source not found.**).

Moderne Hochleistungsbahnen benötigen zum Teil Tragseile in vollverschlossener Machart um 70mm Durchmesser mit einem Metergewicht von ca. 28kg [4]. Da die europäischen Fachfirmen international Projekte ausführen, fallen auf Baustellen z.B. im asiatischen Raum besonders hohe Kosten durch den Transport- und Material-Aufwand sowie den Zeitaufwand für mehrere Stufen beim Seilzug an.

Beim Seilzug muss penibel auf eine Blockade der unterschiedlichen Seildrehmomente von unterschiedlichen Vorseilen bzw. Vorseil und Hauptseil geachtet werden, da eine Verdrehung während der Montage die Seillebensdauer im Betrieb massiv beeinträchtigen können (vgl. Abbildung 4). Zudem steigt das Risikopotential für Verzögerungen und Unfälle bei wiederholter Durchführung des komplexen Montageprozesses.

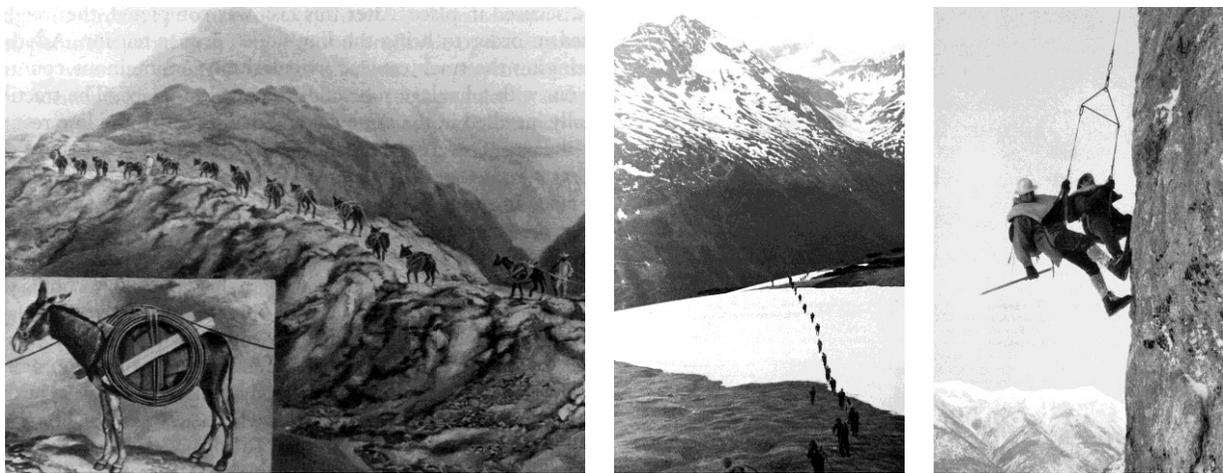


Abbildung 2: Seiltransporte (von links nach rechts) mit Eseln in den Anden [5], mit Menschenhand beim Bau der Galzigbahn [6] und beim Ziehen des Vorseils an der Zugspitze [7]



Abbildung 3: Letzte Stufe des Seilzugs einer Pendelbahn (Quelle: g-link.at)



Abbildung 4: Drallknebelung beim Abspannen eines Förderseils (Quelle: seilbahnen-kogler.at)

Dies führte beim Seilbahnhersteller zu der Idee, den Seilzug anstatt mit Stahlseilen nunmehr mit einem einzigen, ausreichend dimensionierten hochfesten Faserseil durchzuführen, welches direkt per Helikopter geflogen werden kann, um mit diesem anschließend direkt das Hauptseil einzuziehen. Die folgenden Abschnitte sollen erläutern, wie der Weg von der Idee, ein Faserseil industriell und in rauer Umgebung einzusetzen, bis zur Umsetzung mit zugehörigem Sicherheitskonzept aussehen kann.

Projektbeginn und Überprüfung der technischen Machbarkeit

Der Seilbahnhersteller ging auf eine Seilerei mit Referenzen im Stahl- und Faserseilbereich zu, um die Idee eines leichten Vorseils aus hochfesten Fasern zu diskutieren. Gemeinsam einigte man sich auf eine geeignete Seilkonstruktion, die unter anderem folgende Eigenschaften erfüllt:

- Geringes Eigengewicht
- Ausreichende Bruchkraft mit Sicherheitsfaktor 3 zur maximal auftretenden Seilzugkraft im Montageprozess
- Gute Biegsamkeit über Montagerollen
- Drallarme Ausführung
- UV-Beständigkeit

Aus diesen Gründen wurde zur Pilotanwendung ein Dyneema-Geflecht ausgewählt,

Tabelle **1** fasst eine Auswahl der technischen Daten zusammen.

Tabelle 1: Daten des für den Feldtest ausgewählten hochfesten Faserseils

Seildurchmesser d_{Nenn} [mm]	22,0
Seilkonstruktion	Offenes Geflecht, 12-fach geflochten, rotes Coating
Herstellerbezeichnung	LIROS D-PRO-XTR
Werkstoff	Dyneema
Mindestbruchkraft F_{min} [kN]	300,0

Ein neuwertiges Seil ausreichender Länge dieser Machart wurde anschließend für den Einzug der Tragseile einer großen Pendelbahn im Feld probeweise verwendet (vgl. Abbildung 5). Insgesamt wurden vier Tragseile unter besonderer Überwachung von erfahrenem Fachpersonal mit der neuen Methode montiert.

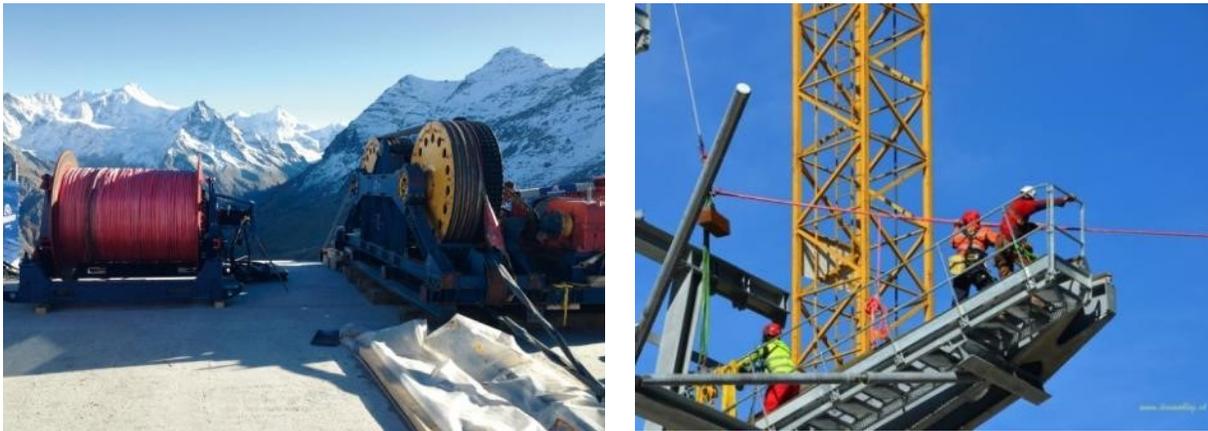


Abbildung 5: Pilotseilzug mit neuem hochfesten Dyneema-Seil (Quelle: espazium.ch / blog.i-g.ch)

Anschließend wurde das Seil einer Sichtprüfung unterzogen und der Seilzustand dokumentiert. Das Seil wurde nun am freien Ende zur Probenentnahme gekürzt. Diese abgetrennten Stücke des ehemals belasteten Seilstrangs wurden mit gespleißten Kauschen versehen und in Zugversuchen bei der Jakob AG bis zum Bruch belastet, um Aufschluss über die verbleibende Tragsicherheit zu erhalten.

Es stellte sich den Beteiligten nun die Frage, bis zu welcher Anzahl von Montageeinsätzen das Seil sicher betrieben werden kann, bzw. ab wann ein Bruch des Seils zu erwarten wäre. Daher wurde die Abteilung Seiltechnologie des Instituts für Fördertechnik und Logistik der Universität Stuttgart (IFT) hinzugezogen und gemeinsam ein Prüfprogramm aufgesetzt. Das Ziel ist die Ermittlung der gewünschten Werte sowie ein Konzept zur Bewertung des sicheren Einsatzzustandes des Seils in der Praxis in Form eines Handbuchs für den Anwender.

Durchführung von Laborversuchen in Stuttgart

Einige der nun folgenden Parameter wurden bewusst konservativ gewählt, um trotz aller Sorgfalt in der Planung zusätzliche Sicherheit zu schaffen. Es wurden drei Seilkonstruktionen für die nun folgenden Versuche vorgesehen (vgl. Abbildung 6), deren Grundeigenschaften in Form von Nenndurchmesser und Mindestbruchkraft gleichwertig sind, vgl. Tabelle 2:

Tabelle 2: Daten der für Dauerbiegeversuche ausgewählten Seilkonstruktionen

Seildurchmesser d_{Nenn} [mm]	22,0		26,0 / 22,0
Seilkonstruktion	Offenes Geflecht 12-fach geflochten rotes Coating	Offenes Geflecht 12-fach geflochten weißes Coating	ummanteltes Geflecht 12-fach geflochten rotes Coating
Herstellerbezeichnung	LIROS D-PRO-XTR	ähnlich LIROS D-PRO-XTR	LIROS Racer-XTR
Werkstoff	Dyneema		
Mindestbruchkraft F_{min} [kN]	300,0		



Abbildung 6: Prüfmuster (1) bis (3) im Lieferzustand

Die Prüflinge wurden nun zum Vergleich unter 100kN Seilzugkraft, somit bei Sicherheitsfaktor 3, auf einer Dauerbiegemaschine des IFT bis zum Bruch getestet. Das Versuchsseil wird bei dieser Versuchsanordnung um eine Prüfscheibe aus PA6 gelegt, deren Werkstoff und Dimensionen annähernd den in der Praxis eingesetzten Stütz- und Umlenkrollen in der Seilbahnmontage entsprechen. Es lag ein Durchmesser Verhältnis D/d zwischen Prüfscheibe und Seil von 11 vor. Durch die oszillierende Hin- und Her-Bewegung der Antriebsscheibe läuft das Prüfseil über die Prüfscheibe und nimmt die Zustände gerade, gekrümmt und wieder gerade ein. Das Seil wird dabei praxisnah durch Biegewechsel beansprucht (vgl. Abbildung 7). Die Dehnung hochfester Faserseile und Setzung von gespleißten Endverbindungen stellt bei Biegeversuchen auf klassischen Drahtseil-Biegemaschinen eine gewisse

Herausforderung dar, denn die Spannwege von Hebelmechaniken oder Hydraulikzylindern reichen oft für die hier auftretende Längung der Prüflinge nicht aus. Durch bewusste Unterdimensionierung der Prüflänge in Kombination mit mechanischer Vorreckung der Seile lässt sich das Problem ebenso eingrenzen wie z.B. durch mehrfach abgebohrte Prüflaschen, die ein nachsetzen der Seilschleife erlauben, siehe nachfolgende Abbildung 8.



Abbildung 7: Dauerbiegeversuch mit rotgecoatetem Prüfling

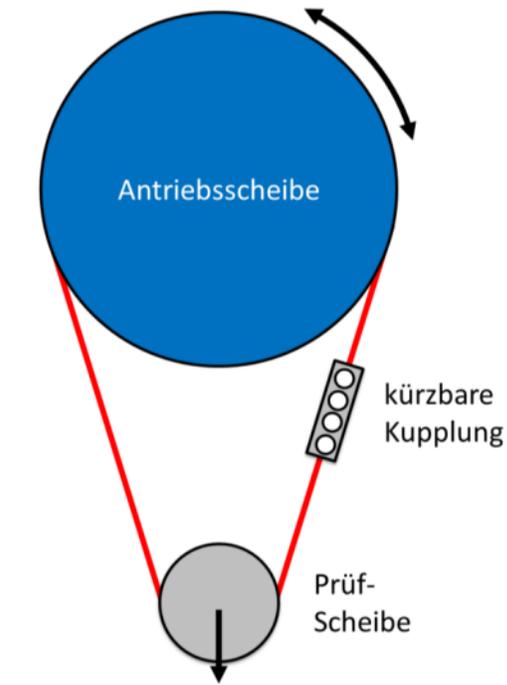


Abbildung 8: Prinzip des Dauerbiegeversuchs und Ausgleich der Seildehnung

Die erste Versuchsreihe zeigte, dass selbst mit 15s pro Biegewechsel eine zu starke Erwärmung im Inneren der Biegezonen auftrat. Eine Halbierung der Prüfgeschwindigkeit auf 30s pro Biegewechsel brachte stabile Ergebnisse bei Oberflächentemperaturen, die sich asymptotisch auf maximal 45°C einstellten. Zudem musste die Geometrie der Prüfscheibe leicht angepasst werden, um ein Entgleisen der Prüflinge unter Verschleiß und daraus resultierendem Drall zu verhindern.

Als Ergebnisse der Dauerbiegeversuche bis Bruch konnte folgendes festgestellt werden:

- Die verschiedenen Seilkonstruktionen erreichten ähnliche Lebensdauerwerte im Bereich von 800 Biegewechseln.
- Die gemantelte Konstruktion kann bei Bedarf als mechanischer Schutz vorgesehen werden, bewirkt aber keinen Lebensdauerzugewinn im Labor.
- Alle Seile zeigten erst wenige Biegewechsel vor Bruch starke Fransenbildung und gerissene Litzen (siehe Abbildung 9). Der Bruch kündigte sich durch knackende Geräusche an.
- Der mittlere Durchmesser der Prüflinge nahm in der oval bis rechteckig verformten Biegezone kontinuierlich über die Versuchsdauer ab.

Die Pilotkonstruktion mit rotem Coating konnte somit beibehalten werden. Anschließend wurden Prüflinge mit rotem Coating bis 100, 300 und 500 Biegewechsel belastet und weiterführend auf einer kalibrierten Zugprüfmaschine zerrissen (vgl. Abbildung 10). Es zeigte sich keine kontinuierliche Bruchkraftabnahme, stattdessen versagten alle Prüflinge nahezu konstant im Bereich von 80% der angegebenen Mindestbruchkraft im geraden Seilstrang direkt am Beginn des Spleißbereichs. Der Seilhersteller gab an, dass dieses Verhalten natürlich sei und auf die für den Versuch gekürzte Spleißlänge zur Dehnungsreduktion zurückzuführen ist.



Abbildung 9: Seilmuster kurz vor Bruch



Abbildung 10: Bruchende des zuvor bis 300 Biegewechsel gefahrenen Musters

Definition sicherer Einsatzgrenzen und Handlungsempfehlungen

Es galt nun, dem Anwender der hochfesten Faserseile ein für die Praxis anwendbares Handbuch zur Verfügung zu stellen, mit dessen Hilfe der Seilzustand und die nutzbare Restlebensdauer bestimmt werden können. Aus den Versuchen wurde daher zuerst unter Berücksichtigung der Streuung und eines Sicherheitsfaktors eine maximale Anzahl von nutzbaren Biegewechseln definiert, nach denen ein Montage-seil aus hochfesten Fasern zu tauschen ist. Da in der Seilmontage der Garaventa AG nur wenige klassische Stütz- und Führungselemente verwendet werden, konnte dem Handbuch eine Tabelle zur Abstraktion der beanspruchenden Elemente zugefügt werden, aus der sich die Anordnung der Stützelemente im Feld zusammensetzen und die äquivalente Biegebeanspruchung ermitteln lässt (siehe Abbildung 11). Die verwendeten mechanischen Elemente sind:

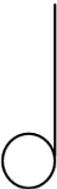
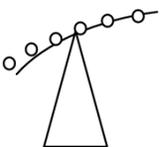
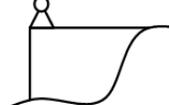
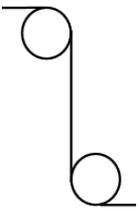
					
Seiltrommel / Winde	Stützenauflage / Rollenbatterie	Gelände- Bodenrolle	Bodenrolle an Fundament	Umlenkpunkt	Gegenbiegung

Abbildung 11: Skizzen typischer Beanspruchungsformen des Vorseils bei der Seilmontage

Rechenbeispiele im Handbuch unterstützten dabei das Verständnis dieser Methode, die weitestgehend an die Bestimmung der Biegewechselzahl nach DIN 15020, Teil 1 angelehnt ist [8]. Jedoch werden andere, dem vorliegenden Fall angepasste Faktoren für die jeweilige Beanspruchungssituation verwendet.

Zudem enthält das Handbuch Anweisungen zur Sichtprüfung und Angaben zu klassischen sichtbaren Ablegekriterien, die unter anderem durch lokale Schädigungen aus der Handhabung des Seils im Feld erreicht werden können. Somit sind auch solche Fälle sicher abgedeckt, in denen das Seil nicht durch Ermüdung, sondern äußere Einflussfaktoren nicht mehr unter ausreichender Sicherheit betrieben werden kann. Zudem werden Hinweise zur Handhabung und Lagerung gegeben. Der Kreis der Personen, die mit dem Seil arbeiten dürfen, wird eingeschränkt.

Grundsätzlich ist das Seil selbst bei geringem Gebrauch nach 6 Jahren entweder zu Tauschen oder dem Hersteller zur Beurteilung mit eventueller Verlängerung der Einsatzzeit vorzulegen.

Praxiseinsatz unter sorgfältiger Überwachung

Die gewählte Seilkonstruktion wird nun unter strenger Dokumentation und sorgfältiger Überwachung genutzt. Dazu wird ein Protokoll in Form einer Art Fahrtenbuch geführt, das jeden Einsatz des Seils bei Bahnmontagen erfasst. Ein Beispiel des grundsätzlichen Aufbaus dieses Protokolls wird in der folgenden Tabelle 3 gezeigt.

Im Interesse aller Beteiligten, und um die innovative Lösung nicht durch unvorhergesehene Vorfälle im Keim zu ersticken, wurden strenge Überwachungskriterien und konservative Versuchsbedingungen bzw. Grenzwerte festgelegt. Bei Erreichen der maximalen Einsatzdauer nach Zeit oder Biegewechseln bzw. beim Erkennen Ablegereife durch Sichtprüfung sollen daher weitere Untersuchungen am real eingesetzten Seil durchgeführt werden, indem wieder die höchstbeanspruchte Stelle gekürzt und dieser entnommene Abschnitt zerstörend geprüft wird. Durch die Ergebnisse weiterer Zugversuche oder z.B. durch Öffnen der Prüfmuster zur Bestimmung des inneren Verschleißzustandes sind mit wachsender Erfahrung im Einsatz der neuen Methode in Zukunft angepasste Grenzwerte vorstellbar. Außerdem könnten zusätzlich für das konkrete Montageprojekt Seilkräfte berücksichtigt werden, um bei kleineren Zugkräften mit Hilfe von Reduktionsfaktoren mehr Biegewechsel zur erlauben. Dies kann einen noch wirtschaftlicheren Einsatz der hochfesten Faserseile in der Seilbahnmontage in Zukunft ermöglichen. Das dem Anwender vorgelegte Handbuch ist daher als erster Schritt in den sicheren Praxiseinsatz zu

verstehen. Durch sorgfältige Rückmeldung der Betriebsdaten an alle Projektbeteiligten können hier langfristig Modifikationen zur optimierten Beurteilung und Anwendung vorgenommen werden.

Tabelle 3: Beispiel des Seilzugprotokolls zur Ermittlung der nutzbaren Restlebensdauer

LIROS D-Pro-XTR „rot“ mit Schutzmantel, Inventarnummer 000.1			
Inbetriebnahme des Seils: 17.09.2016			
Seilzug Nr.	1	2	3
Projekt / Ort	Anlage A	Anlage B	...
Datum	xx.xx. - xx.xx.2016	xx.xx. - xx.xx.2016	...
Eingesetzte Mittel	1 x Seiltrommel (Abwickeln im Tal) 2 x Stützensauflage 2 x Bodenrolle 1 x Gegenbiegung 1 x Umlenkpunkt 1 x Winde (Aufwickeln am Berg)	1 x Seiltrommel (Abwickeln im Tal) 3 x Stützensauflage 1 x Gegenbiegung 1 x Winde (Aufwickeln am Berg)	...
Biegewechsel je Seilzug	9 <i>(Angabe fiktiv!)</i>	7 <i>(Angabe fiktiv!)</i>	...
Anzahl Seilzüge	4	2	...
Summe Biegewechsel	36	14	...
Verbleibende Maximale Anzahl Biegewechsel	266 <i>(Angabe fiktiv!)</i>	252 <i>(Angabe fiktiv!)</i>	
Sichtkontrolle	Keine Auffälligkeiten	Keine Auffälligkeiten	
Verantwortlicher	Kühner, Konstantin IFT Universität Stuttgart	Kühner, Konstantin IFT Universität Stuttgart	

Zusammenfassung

Im vorliegenden Projekt sollte ein Faserseil in der Montage von alpinen Seilbahnanlagen beim Einziehen der Stahldrahtseile als einziges Vorseil ins Gelände geflogen und zum Seilzug eingesetzt werden. Nach einem grundlegenden Nachweis der Machbarkeit wurde durch eine Kombination aus Biege- und Zerreißversuchen an der Universität Stuttgart in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern die Biegung der Seile über Montagerollen bei Höchstlast nachgestellt und somit die maximale Lebensdauer unter höchster Beanspruchung sowie die Seilbruchkraft nach bestimmten Zyklenzahlen bestimmt.

Mit den Kennwerten konnte zusammen mit üblichen, optisch feststellbaren Ablegekriterien ein Handbuch für den Einsatz des Seils erarbeitet werden, das dem Anwender nun einen sicheren Einsatz des Seils und rechtzeitigen Ersatz bei ausreichender Wirtschaftlichkeit ermöglicht.

Nach einer Pilotphase mit dem Beurteilungssystem des Handbuchs könnten durch erneute Begutachtungen des Seils sowie durch weitere Zugversuche an bereits abgelegten Seilmustern die scharfen Bewertungskriterien des ersten Einsatzes schrittweise gelockert werden.

Der hier beschriebene Weg von der Idee bis zum standardisierten Einsatz kann ein Musterbeispiel für neue Anwendungsgebiete von Faserseilen im industriellen Umfeld sein.

Literatur:

- [1] Feyrer, Klaus (2000): Drahtseile. Bemessung, Betrieb, Sicherheit. Springer-Verlag, Wien.

- [2] Kopanakis, Georg (2012): Das Seil einer Seilbahn heute, Internationale Seilbahnrundschau Nr. 2/2012, Bohmann Verlagsgruppe, Wien.

- [3] Oplatka, Gabor (2007): 50 Jahre Entwicklung der Seilbahnseile und der Seilfreundlichkeit der Bahnen, in „50 Jahre Seilbahnen der Schweiz“, Eigenverlag Vereinigung Technisches Kader Schweizer Seilbahnen, Moosleerau (CH).

- [4] Fatzer AG (2009): Seiltabellen, Vollverschlossen 3- und mehrlagig – INTEGRA, Eigenverlag, Romanshorn

- [5] Trennert, Robert A. (2001): Riding the High Wire - Aerial Mine Tramways in the West, University Press of Colorado.

- [6] König, Bernhard (1987): 50 Jahre Galzigbahn, Eigenverlag Arlberger Bergbahnen AG, Innsbruck / St. Anton am Arlberg.

- [7] Schmidt, Bernhardt (1963): Zur Eröffnung der Seilbahn Eibsee-Zugspitze, Eigenverlag Bayerische Zugspitzbahn AG, Garmisch-Partenkirchen.

- [8] DIN 15020, Blatt 1 (1974): Hebezeuge – Grundsätze für Seiltriebe – Berechnung und Ausführung, Beuth Verlag, Berlin.