



Institut für Werkstoff-Fragen und Materialprüfungen

**IWM Glattbrugg**  
Industriestrasse 59  
CH-8152 Glattbrugg  
Fon: 043 211 6070  
Fax: 043 211 6071  
Mail: [institut@iwmm.ch](mailto:institut@iwmm.ch)  
URL: <http://www.iwmm.ch>

Bundesamt für Verkehr (BAV)  
Herrn U. Amiet  
Bollwerk 27/29  
3003 Bern

Auftrags-Nr. 03.1163  
Art des Dokumentes: Technischer Bericht

Gegenstand: **Technische Anforderungen an Montageklemmen**  
Anlage: -  
Anlagen-Nr.: -

Auftraggeber: Bundesamt für Verkehr  
Bollwerk 27/29  
3003 Bern

Referenz: Ihr Auftrag vom 2.12.2003

Inhalt:

1.	Auftrag.....	2
2.	Vorgehen.....	2
3.	Analyse und Klassierung von Ursachen von Seilschäden.....	3
4.	Grenzen des Einsatzes von Montageklemmen.....	4
5.	Mögliche Fehlerquellen beim Einsatz von Montageklemmen.....	6
6.	Konstruktive Beurteilung von Montageklemmen.....	7
7.	Zusammenfassung.....	8
8.	Beilagen.....	9

Seitenzahl: 19 Total (inklusive Titelblatt und Beilagen)  
9 Bericht  
10 Beilagen

Verteilen: Auftraggeber (2), Auftragsdossier (1)

## **1. Auftrag**

### **1.1 Ausgangslage**

In den letzten Jahren sind Fälle von Seilschädigungen gefährlicher Art aufgetreten, die eindeutig auf die Anwendung falscher Montageklemmen und / oder falscher Handhabung derselben zurückzuführen sind.

Es existieren in der (internationalen) Seilbahnbranche keine Normen oder Richtlinien, die die Anforderungen oder den Umgang mit Montageklemmen regeln.

Art. 41.3 der Seilverordnung vom 13.12.1993 ist sehr allgemein abgefasst.

### **1.2 Ziel und Zweck des Auftrags**

Ziel dieses Auftrags ist die Erstellung eines Leitfadens zur Gestaltung und Handhabung von Montageklemmen.

Die Konstruktion und die Anwendung von Montageklemmen ist zu analysieren, es sind die Schwachstellen aufzuzeigen und Verbesserungsvorschläge im Hinblick auf die Formgebung und die Handhabung aufzuführen.

## **2. Vorgehen**

### **2.1 Unterlagen und Normen**

Wie im Abschnitt 1.1 erwähnt, gibt es keine nationalen und internationalen Normen, die den Einsatz von Montageklemmen regeln. Hingegen gibt es eine EN Norm zum Thema Endbefestigungen<sup>1</sup>, in der auch Klemmplatten erwähnt sind. Die in dieser Norm erwähnten Anforderungen an Klemmplatten müssen zur Beurteilung von Montageklemmen beigezogen werden.

Daneben existiert eine ältere experimentelle Arbeit über die Ermittlung von Reibwerten zwischen Seil und Klemmen, die für die Beurteilung der Norm nützlich ist.

Vom Bundesamt für Verkehr wurde uns eine Liste mit Seilschädigungen, die vermutlich auf fehlerhaften Umgang mit Montageklemmen zurückzuführen waren, zur Verfügung gestellt. Einige wenige dieser Schadenfälle wurden eingehender untersucht. Diese Untersuchungsberichte lagen uns ebenfalls vor.

Von Herstellern wurden uns Konstruktions- und Anwendungsgrundlagen zur Verfügung gestellt, die wir gesichtet und überprüft haben.

### **2.2 Eigene Untersuchungen**

Wir haben im Lauf dieser Arbeit versucht, Schädigungsgrenzen für Litzenseile beim Einsatz von Montageklemmen herzuleiten. Auf Grund von grundsätzlichen Überlegungen wird klar, dass man für diese Abschätzungen ein Seil mit Litzenberührung betrachten muss. Auf der Basis der Hertz'schen Theorie über die Flächenpressungen haben wir die Kontaktspannungen in den Drähten berechnet. Da die Kontaktspannungen nur schwach von den Belastungen abhängen, und auf Grund der unklaren Definition der „Schädigung“, ist es mit dem heutigen Wissenstand nicht möglich, einen scharfen theoretischen Grenzwert für die zulässige Belastung anzugeben.

### **2.3 Vorgehen und Bericht**

In einem ersten Schritt (Abschnitt 3) werden die Fehler im Umgang mit Montageklemmen analysiert und kategorisiert. Es wird gezeigt, welche Schädigungen auftreten, wie sie verursacht werden und wie relevant sie für die weitere Lebensdauer eines Seils sind. In einem zweiten Schritt werden

---

<sup>1</sup> EN 12927-4 Safety requirements for cableway installations designed to carry persons - Ropes - Part 4: End fixings.

die Nutzungsgrenzen von Montageklemmen aufgezeigt (Abschnitt 4). Diese basieren einerseits auf der Norm EN 12927-4, in der unter anderem der Einsatz von Klemmplatten als Endbefestigungen geregelt ist, andererseits auf eigenen Untersuchungen. Wir sind der Meinung, dass die EN Norm auch für den Einsatz von Montageklemmen angewendet werden sollte. In einem dritten Schritt werden mögliche Fehler beim Einsatz von Montageklemmen zusammengestellt (Abschnitt 5). Diese Aufzählung ist naturgemäss nicht abschliessend, sie muss gegebenenfalls ergänzt werden.

Im Abschnitt 6 wird kurz auf die Formgebung einer Montageklemme eingegangen. Im Anhang 1 befindet sich ein Beispiel einer Auslegung einer Montageklemme in Anlehnung an die EN 12927-4. Der Anhang 2 enthält eine Checkliste, die den korrekten Einsatz von Montageklemmen erleichtern soll.

### 3. Analyse und Klassierung von Ursachen von Seilschäden

Wir haben die vom BAV zur Verfügung gestellte Dokumentation der Seilschäden gesichtet und mit eigenen Erfahrungen aus unserer Praxis als Seilprüfstelle in der Schweiz ergänzt. Die auf den Einsatz von Montageklemmen zurückzuführenden Schäden lassen sich in drei Kategorien unterteilen:

#### 3.1 Seilschäden als Folge gerutschter Montageklemmen

Diese Kategorie Seilschäden sind die spektakulärsten und gefährlichsten, die durch den Einsatz von Montageklemmen verursacht werden. Wird eine Montageklemme ungenügend oder unsachgemäss angezogen, so kann sie die Zugbelastung des Seils nicht übertragen. Sie beginnt zu rutschen und hinterlässt auf dem Seil einen Schaden, der bei einer ersten Begutachtung häufig unterschätzt wird. Die Zone, über der die Montageklemme gerutscht ist, ist häufig etwas bläulich angelaufen, zeigt in der Regel Kratzspuren und eventuell verbogene Drähte. Es kann aber auch zu Kaltverschweissungen mit Materialdeposition auf der Drahtoberfläche kommen<sup>2</sup>. Vielfach sind keine Drahtbrüche zu sehen<sup>3</sup>.

Eine metallurgische Analyse der Drähte zeigt jedoch, dass an der Drahtoberfläche Reibmartensit<sup>4 5</sup> entsteht, der schon unmittelbar nach dem Ereignis mit kleinen Anrissen durchsetzt ist. Werden keine Massnahmen getroffen, entwickeln sich vor allem bei umlaufenden Seilen in der geschädigten Zone systematisch Drahtbrüche. In extremen Fällen treten Drahtbrüche an allen Aussendrähten in sehr kurzem Zeitabstand auf, was zu einem massiven Bruchkraftverlust des Seils führen kann.

Bei festen Seilen (Tragseilen) spielen Ermüdungsbrüche von Aussendrähten als Folge von Reibmartensit eine kleinere Rolle. Dies geht einerseits aus dem Bericht der UUS hervor, andererseits wird dieser Befund von einer Arbeit von Oplatka bestätigt<sup>6</sup>. Beim Vorliegen von Materialdepositionen besteht die Gefahr von Spannungsrisskorrosion in den Aussendrähten.

**Fazit:** *Seilschäden, die auf gerutschte Montageklemmen zurückzuführen sind, müssen bei umlaufenden und festen Seilen zwingend so schnell wie möglich repariert werden.*

---

<sup>2</sup> Siehe Bericht der UUS zu Schadenfall am Tragseil B der Pendelbahn Mürren - Birg vom 29.12.2004, der Bericht ist unter <http://www.uus.admin.ch> publiziert.

<sup>3</sup> Montageklemmen mit weicher Einlage verursachen bei Litzenseilen in der Regel deformierte Litzen, unter Umständen mit Drahtbrüchen. Es ist aber nicht grundsätzlich auszuschliessen, dass sich auch Martensit an den Drahtoberflächen bildet.

<sup>4</sup> Wolfstieg, U.: Analyse der thermischen Bildungsbedingungen von Reibmartensit - HTM 29 (1974), Heft 4.

<sup>5</sup> Für die Bildung von Reibmartensit sind Temperaturen von über 900°C (Umwandlungstemperatur A<sub>c3</sub>) erforderlich.

<sup>6</sup> Oplatka, G: Drahtbrüche in Tragseilen infolge von Bildung von Reibmartensit bei Tragseilbremsung - Draht 1973/9, Seite 467 - 469.

### 3.2 Deformierte Seile

Werden nicht passende Montageklemmen verwendet, wird das Seil beim Klemmvorgang nicht richtig gestützt. Dies führt dazu, dass das Seil flach gepresst wird. Nach dem Entfernen der Montageklemme bleibt das Seil dauerhaft deformiert, und weist also in zwei senkrecht zu einander liegenden Richtungen nicht mehr den gleichen Durchmesser auf.

Die Auswirkungen dieses Schadentyps sind unklar, weil dokumentierte Schadenfälle fehlen.

### 3.3 Deformierte Drähte

Werden mit einer Montageklemme zu hohe Flächenpressungen<sup>7</sup> auf das Seil aufgebracht, werden im Seilinneren Drähte deformiert. Von aussen ist nicht notwendigerweise ein Schaden erkennbar. Die im Seilinneren deformierten Drähte können bei der magnet-induktiven Seilprüfung Anzeigen verursachen, die die Auswertung der Prüfsignale beeinträchtigt. In extremen Fällen können Drahtbrüche in einer so vorgeschädigten Zone nicht mehr sicher erkannt werden.

Die Auswirkungen eines solchen Seilschadens ist schwierig zu beurteilen, wir rechnen jedoch mit einer erhöhten Neigung zu Drahtbrüchen an diesen Stellen.

### 3.4 Klassierung der Ursachen von Schädigungen durch Montageklemmen

Die oben dargelegten, typischen, durch Montageklemmen verursachten Schäden an Seilen zeigen deutlich die Problematik bei deren Einsatz:

- Zu kurze oder nicht korrekt angezogene Klemmplatten rutschen auf den Seilen;
- Nicht passende Klemmplatten verursachen Seil deformationen;
- Zu stark angezogene Klemmplatten verursachen Beschädigungen von Drähten.

## 4. Grenzen des Einsatzes von Montageklemmen

### 4.1 Reibungskoeffizienten

Die zwischen Seilen und Montageklemmen auftretenden, globalen Reibungskoeffizienten wurden in früheren Arbeiten bereits ausführlich untersucht<sup>8</sup>. Die Resultate zeigen, dass die bei Versuchen erreichten, globalen Reibungskoeffizienten im Bereich zwischen 0.11 und 0.35 liegen. Tendenziell nimmt der globale Reibungskoeffizient mit der Flächenpressung zu. Da die kleinsten Reibungskoeffizienten bei den Versuchen von Roth mit kleinen Flächenpressungen ermittelt wurden, welche für den praktischen Einsatz keine Bedeutung haben, dürfen sie für die weiteren Betrachtungen ausser Acht gelassen werden.

Trotzdem muss festgehalten werden, dass der in der EN 12927-4 vorgeschlagene globale Reibwert von 0.16 bei Litzenseilen nicht unter allen realistischen, experimentell untersuchten Bedingungen erreicht wird.

Für VV-Seile sieht die EN 12927-4 einen Wert von 0.13 vor.

Eine vorsichtige Wahl des globalen Reibungskoeffizienten für die Auslegung von Klemmplatten ist sicher angezeigt. Nach dem Studium aller uns zur Verfügung stehenden Unterlagen scheint uns ein globaler Reibungskoeffizient von 0.13 für alle Seiltypen sinnvoll.

---

<sup>7</sup> Globale Flächenpressung auf das Seil, berechnet mit der projizierten Klemmfläche, siehe Beilage 1 oder EN 12927-4.

<sup>8</sup> Ermittlung von Reibwerten zwischen Seil und Klemme von Dipl. Ing. M. Roth, Internationale Seilbahn-Rundschau 3/1973.

## 4.2 Zulässige Flächenpressung

In der EN 12927-4 sind die zulässigen Flächenpressungen bei Klemmen explizit erwähnt. Bei Litzenseilen wird eine Flächenpressung von 50 N/mm<sup>2</sup> als zulässig erachtet, bei Tragseilen darf die Flächenpressung bis 150 N/mm<sup>2</sup> erreichen.

Die zulässige Flächenpressung wird im übrigen nicht durch die Kontaktverhältnisse zwischen Montageklemme und Seil vorgegeben, sondern durch die wesentlich ungünstigeren Kontaktverhältnisse zwischen den Drähten zweier benachbarter Litzen beim Litzenseil und zwischen den Runddrähten beim VV-Seil.

Beim Litzenseil hat man für eine Abschätzung von einem gealterten Seil mit Litzenberührung, aber noch ohne Verschleiss auszugehen. In diesem Fall muss die gesamte Klemmkraft durch die Kontaktkräfte der Litzen untereinander aufgenommen werden. Eigene Abschätzungen mit den Hertz'schen Formeln<sup>9</sup> zeigen, dass die Elastizitätsgrenze in den Drähten schon unterhalb der zulässigen Flächenpressung gemäss EN 12927-4 erreicht wird. Weil die Spannungen in den Hertz'schen Formeln proportional der dritten Wurzel der Belastung sind, und das Erreichen der Elastizitätsgrenze nicht unbedingt mit einer Schädigung der Drähte gleichzusetzen ist, ist es schwierig, eine scharfe Grenze für den Beginn der Schädigung anzugeben. Diese Abschätzung zeigt aber die generelle Problematik klar auf. Es ist kaum möglich, Montageklemmen so zu dimensionieren, dass eine plastische Deformation der Drähte in den Seilen beim Einsatz absolut verhindert werden kann. Die durch das Zusammenpressen der Litzen eingebrachte Druck-Vorspannung der Drähte in der Umgebung der Kontaktflächen wirkt sich aber nicht negativ auf das Ermüdungsverhalten der Drähte aus.

**Fazit:** Eine Überprüfung heute üblicher Montageklemmen zeigt, dass mit den vorgeschriebenen Anziehungsmomenten die zulässige Pressung bei Litzenseilen gemäss EN 12927-4 zum Teil deutlich überschritten wird (bis ca. 130 N/mm<sup>2</sup>).

## 4.3 Anziehverfahren

Weder in der EN 12927-4 noch in den uns vorliegenden Auslegungen von Montageklemmen eines Herstellers ist ein Anziehverfahren dokumentiert. In der Regel werden nur Anziehungsmomente angegeben.

Beim Verschrauben von Montageklemmen muss dafür gesorgt werden, dass die gewünschte Flächenpressung möglichst genau eingehalten wird. Weil die Schraubenkräfte in erheblichem Mass vom Reibungskoeffizienten in der Schraubenverbindung abhängen, sollten die Schrauben regelmässig gereinigt und geschmiert werden.

Wir empfehlen, die Anziehungsmomente der Schrauben für gut geschmierte Verhältnisse<sup>10</sup> ( $\mu=0.08$ ) und bei einer 90%-igen Ausnützung der Streckgrenze der Schrauben anzugeben, um ein Überschreiten der zulässigen Flächenpressung unter allen Umständen zu vermeiden (siehe Beilage 3)

Die bei diesem Anziehungsmoment garantierte Vorspannkraft der Schrauben - und damit die garantierte Flächenpressung der Montageklemme - sollte bei relativ schlechten Reibungsverhältnissen in den Schraubenverbindungen abgeschätzt werden ( $\mu=0.24$ ), um den zum Teil problematischen Verhältnissen bei der Montage Rechnung zu tragen. Im ungünstigsten Fall ist damit zu rechnen, dass die erreichte Flächenpressung nur etwa 40 - 50 % der erwarteten Flächenpressung bei günstigen Verhältnissen beträgt (siehe Beilage 3).

Weniger grosse Unsicherheiten beim Anziehen von Schrauben ergeben sich, wenn statt auf ein vorgegebenes Anziehungsmoment auf die Streckgrenze der Schrauben angezogen wird. Eine Schraube wird dabei so stark angezogen, dass das Anziehungsmoment beim weiterdrehen nicht mehr an-

---

9 Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau; 17. neubearbeitete Auflage; Springer Verlag, 1990.

10 Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen, Zylindrische Einschraubverbindungen; VDI-Richtlinie VDI 2230, Blatt 1; Düsseldorf, 2001.

steigt. Wird diese Anziehmethode vorgesehen, müssen die Schrauben nach jedem Einsatz gewechselt werden.

Zuletzt noch eine Bemerkung zur Wahl der Schraubengrösse: Schrauben ab etwa M24 können manuell nicht mehr vernünftig angezogen werden. Müssen grössere Schrauben verwendet werden, sind Vorspannsysteme, wie zum Beispiel "Superbolt"<sup>11</sup> zu verwenden.

#### **4.4 Klemmrillenformen**

Im praktischen Einsatz stehen heute zwei Bauformen: Montageklemmen mit prismatischer Klemmrille und solche mit runder Klemmrille. Beide Bauformen haben Vorteile und Nachteile, die hier kurz erläutert werden sollen.

Die Montageklemme mit runder Klemmrille stützt ein Seil beim Pressvorgang sehr gut. Leider allerdings in engen Grenzen - wenn der Durchmesser nicht auf das Seil abgestimmt ist, führt dies zu Kantenpressungen (zu kleine Rille) oder zu einer ungenügenden Stützfunktion (zu grosse Rille). Die EN 12927-4 empfiehlt einen Rillenradius von 0.525 bis 0.55 mal Seildurchmesser und einen Mindestabstand der beiden Hälften der Montageklemme im geklemmten Zustand von 2 mm. Der Umschliessungswinkel der Klemmrille sollte mindestens 125° betragen (siehe auch Beilage 1).

Montageklemmen mit prismatischer Klemmrille sind flexibler im Einsatz, sie weisen einen grösseren Durchmesserbereich auf. Nachteilig ist ihre etwas schlechtere Stützwirkung. Klemmen mit prismatischer Klemmrille sind in der EN 12927-4 nicht erwähnt.

### **5. Mögliche Fehlerquellen beim Einsatz von Montageklemmen**

#### **5.1 Einsatz unpassender Montageklemmen**

Die Grösse der Montageklemmen muss auf den Einsatz abgestimmt sein, sowohl in Bezug auf die auftretenden Zugkräfte, wie auch auf den Seiltyp. Die in der EN 12927-4 angegebenen Flächenpressungen sollten nicht überschritten werden. Wenn Montageklemmen mit runder Klemmrille eingesetzt werden, sollten die Rillenradien den Vorschriften entsprechen (Radius 0.525 - 0.55 mal Seildurchmesser). Bei Montageklemmen mit prismatischen Rillen ist darauf zu achten, dass keine Kantenpressung entsteht. Ebenso ist darauf zu achten, dass zwischen den beiden Hälften der Montageklemmen im angezogenen Zustand ein ausreichender Abstand besteht. Berühren sich die beiden Hälften, kann trotz allen Vorsichtsmassnahmen keine definierte Pressung garantiert werden.

Die Anforderungen der Norm schränken die Flexibilität der Anwendung von Montageklemmen stark ein. In der Praxis ist wohl häufig die passende Klemme nicht vorhanden, was dazu verleitet, eine nicht passende, aber vorhandene Montageklemme zu benutzen.

#### **5.2 Unkorrektes Anziehen der Montageklemmen**

Insbesondere bei Litzenseilen nimmt der Seildurchmesser beim Klemmen und auch beim nachfolgenden Belasten ab. Es ist deshalb wichtig, dass die Schrauben der Montageklemmen gleichmässig angezogen werden, und die Anziehmomente nach Abschluss des Anziehens in regelmässigen Abständen kontrolliert und die Schrauben gegebenenfalls nachgezogen werden. Besonders wichtig ist diese Kontrolle während dem Belasten eines am Anfang ungespannten Seils.

Es ist auch darauf zu achten dass die Schraubenverbindung sauber und geschmiert ist, sonst werden die vorgesehenen Klemmkkräfte nicht erreicht.

Bei der Auswahl der Drehmomentschlüssel ist auf den Messbereich zu achten. Das vorgeschriebene Drehmoment sollte im mittleren Messbereich des Schlüssels liegen. Anziehmomente im Endbereich sind generell ungenau. Eine Montageklemme muss zwingend mit einem Drehmomentschlüssel angezogen werden.

---

<sup>11</sup> P&S Vorspannsysteme AG, Rietwiesstrasse2, 8735 St. Gallenkappel, <http://www.p-s.ch>

Wie schon unter 5.1 erwähnt muss im angezogenen Zustand kontrolliert werden, dass zwischen den beiden Hälften der Montageklemme ein ausreichender Abstand besteht. Die beiden Hälften dürfen sich nirgends berühren.

### **5.3 Fehlende Kontrolle der Klemmverbindung**

Nach dem Verschrauben einer Montageklemme und vor der Belastung muss in Zugrichtung hinter der Klemme eine Markierung (Farbe oder Klebband) angebracht werden. Vor dem Entfernen der Montageklemme ist diese Markierung zu kontrollieren. So kann auf einfache Art und Weise festgestellt werden, ob eine Montageklemme gerutscht ist, oder nicht.

Fehlt diese Kontrolle, und ist eine Montageklemme tatsächlich gerutscht, kann sich unerkannt ein grösserer Seilschaden entwickeln. Ist eine Montageklemme gerutscht, ist der Seilhersteller unbedingt zu informieren. Mit einer geeigneten Reparatur können grössere Folgeschäden in vielen Fällen verhindert werden.

## **6. Konstruktive Beurteilung von Montageklemmen**

### **6.1 Prismatische oder runde Klemmrille?**

Diese Frage wird in der Branche kontrovers diskutiert. Analysiert man sachlich alle Vor- und Nachteile der einen oder anderen Bauform, so ergibt sich keine eindeutige Präferenz.

Der Vorteil der Montageklemme mit runder Klemmrille liegt eindeutig in der besseren Stützfunktion der Rille, die sie allerdings nur in einem ganz engen Durchmesserbereich ausspielen kann (5 - 10 % Durchmesservariation gemäss EN 12927-4). Ausserhalb dieses Bereichs ist die Montageklemme mit prismatischer Rille entweder ebenbürtig oder besser. Für Montagearbeiten wird deshalb in den allermeisten Fällen die flexiblere Montageklemme mit der prismatischen Rille bevorzugt.

### **6.2 Harte oder weiche Oberfläche?**

Auch diese Frage wird kontrovers diskutiert. Wir haben im Rahmen dieses Projekts die Frage zwar aufgegriffen, sind aber nicht zu einem eindeutigen Schluss gekommen. Da, wie in Abschnitt 4.2 diskutiert, die Kontaktverhältnisse im Inneren des Seils ungünstiger sind als zwischen Montageklemme und Seil, spielt die Härte der Oberfläche der Montageklemmen nicht eine derart grosse Rolle. Wegen der eher günstigeren Kraftübertragung zwischen Montageklemme und Litzenseilen, könnten Montageklemmen mit weicher Oberflächen eher etwas kompakter gebaut werden. Bei unsachgemäßem Einsatz ist bei beiden Klemmentypen mit grösseren Seilschäden zu rechnen.

Bei richtiger Auswahl und korrektem Einsatz sind die zwei Typen in Bezug auf die Schädigung eines Seils jedoch ebenbürtig. Um die technische Entwicklung nicht zu behindern, sind in diesem Bericht keine Empfehlungen über die Wahl des Einlage-Materials enthalten. Neuartige Einlage-Werkstoffe sollten jedoch mittels Abzugsversuchen auf ihre Eignung hin überprüft werden.

### **6.3 Länge von Montageklemmen**

Die Länge von Montageklemmen ist der zentrale Parameter, mit dem die korrekte Funktion steht und fällt. Aus Sicht des Ingenieurs ist eine möglichst lange Montageplatte zu bevorzugen, in der das Seil nur wenig gepresst werden muss um die notwendigen Zugkräfte zu übertragen. Der Monteur bevorzugt hingegen eine möglichst kurze Montageklemme, die er besser handhaben kann.

Mit dem Erscheinen der EN 12927-4 liegt erstmals ein Dokument mit normativem Charakter vor. Auch wenn die EN 12927-4 Endbefestigungen beschreibt, kann sie für die Auslegung von Montageklemmen nicht ignoriert werden. Wir empfehlen, die darin enthaltenen Werte für Reibungskoeffizienten, maximale Flächenpressungen sowie Geometrie (soweit anwendbar) auch für Montageklemmen anzuwenden.

Prismatische Klemmen sind in der EN 12927-4 nicht enthalten. Wir empfehlen bis zum allfälligen Vorliegen einer konkreten Norm die EN 12927-4 auch für prismatische Montageklemmen sinngemäss anzuwenden.

Mit dieser Grundlage lässt sich die Mindestlänge von Montageklemmen für einen bestimmten Einsatz berechnen (siehe auch Beilage 1).

**Fazit:** *Etliche zur Zeit verwendete Montageklemmen sind so kurz, dass sie gemäss EN 12927-4 für Litzenseile nicht geeignet sind.*

#### **6.4 Selbst-nachspannende Montageklemmen**

Seit geraumer Zeit sind Montageklemmen erhältlich, die selbstklemmend oder -nachspannend sind. Damit entfällt das aufwendige und in vielen Fällen wohl auch nicht ganz einfache Nachziehen der Schrauben bei der Belastung. Wir haben im Rahmen dieses Projektes keine solchen Montageklemmen technisch geprüft, sind aber der Meinung, dass sich mit solch innovativen Produkten einige Fehler in der Anwendung eliminieren liessen. Für die technische Auslegung gelten dieselben Regeln, wie sie bereits für klassische Montageklemmen dargestellt wurden.

### **7. Zusammenfassung**

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit dem Einsatz von Montageklemmen bei Seilbahnen. In einem ersten Teil werden Seilschäden in Folge von unkorrekt eingesetzten Montageklemmen analysiert und aufgezeigt, welche Fehler bei der Montage gemacht werden können. In einem zweiten Teil werden mit Hilfe der Norm EN12927-4 die physikalischen Grenzen des Einsatzes von Montageklemmen aufgezeigt und Regeln für deren Konstruktion und Einsatz abgeleitet.

Einige zur Zeit eingesetzte Montageklemmen wurden auf die Konformität mit den in den Normen festgelegten Grenzen geprüft. Es hat sich gezeigt, dass die zulässigen Flächenpressungen für Litzenseile in der Regel überschritten werden und dass die Montageklemmen für zu optimistisch abgeschätzte Zugkräfte eingesetzt werden. Weil bei der Montage auch bisher konsequent auf hohe Sicherheitsfaktoren geachtet wurde (2 bis 3), ist es in der Vergangenheit nur in Ausnahmefällen zu Problemen mit gerutschten Montageklemmen gekommen.

Viel häufiger zu sehen sind Seilschäden, die entweder auf unpassende Montageklemmen oder auf zu hohe Flächenpressung zurückzuführen sind. Weil diese Schäden in der Regel nicht zu gravierenden Konsequenzen führen, sind sie meistens nur dem Seilprüfer bekannt.

Es erscheint uns aus heutiger Sicht sinnvoll, die bei der Montage eingesetzten Montageklemmen generell nachzurechnen und die Monteure über ihren korrekten Einsatz erneut zu instruieren.



## **8. Beilagen**

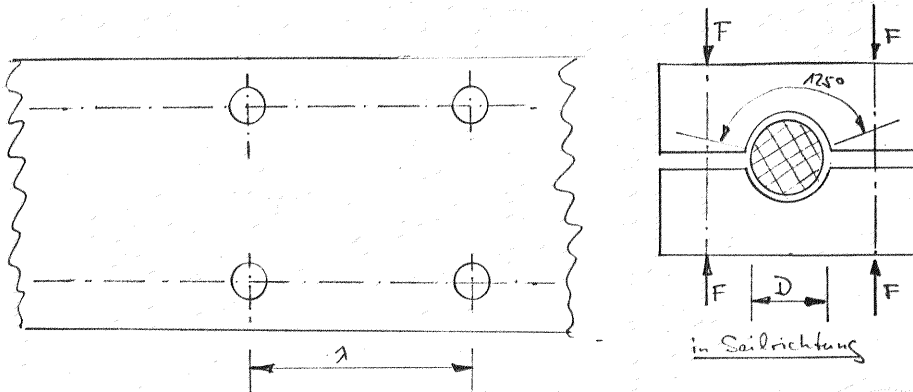
1. Beilage 1: Auslegung einer Montageklemme (2 Seiten)
2. Beilage 2: Checkliste für den Einsatz von Montageklemmen (2 Seiten)
3. Beilage 3: Erläuterungen zur Auslegung und Überprüfung von Klemmplatten (1 Seite)
4. Beilage 4: Tabellen zu Auslegung und Überprüfung von Klemmplatten (5 Seiten)

## Beilage 1: Auslegung einer Montageklemme in Anlehnung an prEN 12927-4

Die Montageklemme soll für ein 40 mm Litzenseil eingesetzt werden. Die garantierte Bruchkraft beträgt 1000 kN, die Sicherheit gegen Bruch betrage 4.5.

$$D = 40 \quad \text{mm}$$

$$S = \frac{1000}{4.5} \quad \text{kN, Seilzug}$$



Die Klemme ist mit 2 N M20 Schrauben, Klasse 8.8 ausgerüstet, die zulässige Pressung beträgt  $50 \text{ N/mm}^2$  (prEN 12927 - 4). Die Schrauben sollen bis 90% der Streckgrenze ausgenutzt werden, für die Auslegung wird ein Reibungskoeffizient von 0.08 vorausgesetzt. Der Lochabstand in Längsrichtung (=Segmentlänge) betrage  $\lambda$  (vorerst unbekannt):

$$F = 136 \quad \text{kN, Vorspannung gemäss VDI 2230}$$

$$M = 0.308 \quad \text{kNm, Anzugsmoment gemäss VDI 2230}$$

$$p = \frac{4 \cdot 1000 F}{\left(\frac{250}{360} \pi\right) D \lambda}$$

$$p = 50 \quad \text{MPa, gemäss prEN 12927 - 4}$$

Damit wird die Segment - Länge der Klemmplatte:

$$\lambda = 125 \quad \text{mm}$$

Die garantierte Vorspannung der Schraubenverbindung beträgt bei einem Reibungskoeffizienten von 0.24 in der Verschraubung

$$F' = 109 \quad \text{kN, Vorspannung gemäss VDI 2230}$$

$$M' = 0.655 \quad \text{kNm, Anzugsmoment gemäss VDI 2230}$$

$$F'' = \frac{M}{M'} F'$$

$$F'' = 51.3 \quad \text{kN, garantierte Vorspannung beim Anzugsmoment M}$$

Berechnung der garantierten Abzugskraft pro Segment gemäss prEN 12927 - 4

$$\mu = 0.16 \quad \text{Reibungskoeffizient gemäss prEN 12927 - 4}$$

$$R = 4 \mu F''$$

$$R = 32.8 \quad \text{kN, garantierte Abzugskraft}$$

Die Anzahl der benötigten Schrauben (pro Seite) beträgt:

$v = 2$  Sicherheitsfaktor  $> 2$  aus grundsätzlichen Überlegungen

$$N = \text{aufrunden} \left( v \frac{S}{R} \right)$$

$N = 14$  Anzahl Segmente der Klemmplatte

$$L = \lambda N$$

$L = 1.75 \times 10^3$  mm, Gesamtlänge der Montageklemme

**Bemerkung 1:** Die Montageklemmen können auch mehrteilig ausgeführt sein.

**Bemerkung 2:** In der prEN 12927 - 4 wird zusätzlich ein Setzungsfaktor von 0.8 benutzt. Da Montageklemmen nur kurzzeitig im Einsatz sind, kann auf diesen Setzungsfaktor verzichtet werden. Voraussetzung dafür ist, dass Montageklemmen während des Abspannens periodisch kontrolliert und die Schrauben gegebenenfalls nachgezogen werden.

## **Beilage 2: Checkliste für den Einsatz von Montageklemmen**

### **Grundlagen**

- Ist der Seilzug bekannt?
- Ist die Montageklemme für den Seilzug ausreichend?
- Ist die Montageklemme für das Seil geeignet (Litzenseil / VV-Seil / Durchmesser überprüfen)
- Sind die Anziehmomente für die Schrauben angegeben?
- Ist die Montageklemme sauber und die Schrauben gefettet (z.B. mit Molykote D Paste, Gewinde und Auflagen fetten)?
- Liegt ein Drehmomentschlüssel mit geeignetem Messbereich bereit?

### **Anziehen der Schrauben**

- Die Schrauben müssen gleichmässig angezogen werden (nicht eine Schraube bis zum Anziehmoment anziehen, und dann zur nächsten Schraube wechseln!).
- Ist der Abstand der zwei Hälften überall etwa gleich und ausreichend? Die beiden Hälften dürfen sich nicht berühren (Mindestabstand 2 mm)!
- Sind alle Schrauben bis zum vorgesehenen Anziehmoment angezogen?
- Wurden alle Schrauben nach dem Anziehen noch einmal kontrolliert?

### **Aufbau der Belastung**

- Wurde in Zugrichtung hinter der Montageklemme eine Markierung angebracht (Farbe oder Klebstreifen)?
- Wurden die Schrauben vor dem Belasten kontrolliert? (Achtung: Litzenseile weisen heute thermoplastische Seelen auf, die unter der Belastung etwas Kriechen, d.h. das Seil wird unter Umständen mit der Zeit immer kleiner und die Schrauben entspannen sich wieder!)
- Beim Erhöhen der Belastung sind die Schrauben periodisch zu kontrollieren! (Achtung: Seile, insbesondere Litzenseile werden beim Belasten kleiner, die Vorspannung der Schrauben reduziert sich damit!)

### **Bei stationärer Belastung**

- Bei länger andauerndem Einsatz sind die Verschraubungen der Montageklemmen gelegentlich zu kontrollieren!

### **Nach dem Entlasten**

- Ist die Montageklemme gerutscht (Markierung kontrollieren)? Falls ja ist der Seilhersteller zu kontaktieren!

### **Nach dem Entfernen der Montageklemmen**

- Sind am Seil sichtbare Schäden entstanden? Sind nicht zu entfernende Metallrückstände auf dem Seil zu finden? Falls ja ist der Seilhersteller zu kontaktieren.

## **Bemerkungen**

Diese Checkliste erhebt keinerlei Anspruch auf Vollständigkeit. Sie wurde dazu entworfen, den Einsatz von Montageklemmen richtig vorzubereiten und durchzuführen. Sie setzt aber Erfahrung im Umgang mit gebräuchlichen Werkzeugen sowie mit Seilen im allgemeinen voraus.

### **Beilage 3: Erläuterungen zur Auslegung und Überprüfung von Klemmplatten**

In der Beilage 4 sind verschiedene Tabellen zur Auslegung von Klemmplatten enthalten. Es sind dies die folgenden Tabellen:

- Auslegung der Verschraubung von Montageklemmen bei Litzenseilen (Seite 15);
- Zulässige Seilkräfte für Montageklemmen bei Litzenseilen (Seite 16);
- Auslegung der Verschraubung von Montageklemmen ( $p=150 \text{ N/mm}^2$ , Seite 17);
- Auslegung der Verschraubung von Montageklemmen ( $p=100 \text{ N/mm}^2$ , VV-Seile, Seite 18);
- Zulässige Seilkräfte für Montageklemmen bei VV-Seilen (Seite 19).

Die Auslegung der Verschraubung geschieht generell Segment-weise, es wird eine garantierte Schraubenkraft ( $F'$ ), eine garantierte Abzugskraft pro Segment ( $R$ ) und eine Mindestlänge  $\lambda$  des Segmentes so ermittelt, dass die zulässige Flächenpressung gemäss EN 12927-4 unter keinen Umständen überschritten wird.

Die zulässigen Seilkräfte ( $S$ ) werden mit Hilfe der garantierten Abzugskraft ( $R$ ) pro Segment, der Anzahl der Segmente ( $N$ ) mit je 2 Schrauben und einem Sicherheitsfaktor von 2.0 ermittelt und in der entsprechenden Tabelle angegeben.

Damit wird es einerseits möglich, Klemmplatten rasch auf ihre Konformität mit der EN 12927-4 zu überprüfen, andererseits ist auch eine Auslegung durchzuführen.

Der Grenzwert der Pressung von  $150 \text{ N/mm}^2$  für VV-Seile ist so gross, dass er mit gängigen Verschraubungen kaum zu erreichen ist. Es wurde deshalb eine Tabelle mit  $100 \text{ N/mm}^2$  Flächenpressung erstellt, die zu vernünftigeren Verschraubungs-Verhältnissen führt.

Beilage 4: Empfohlene Segmentlänge bei Litzenseilen  
 $\rho = 50 \text{ MPa}$

IWM Institut für Werkstoff-Fragen und Materialprüfungen

D	Einh.	M6	M8	M10	M12	M16	M20	M24	M30	M36	Bemerkungen
[mm]	M [Nm]	7.7	18.5	36	63	153	308	529	1053	1825	Empfohlenes Anziehmoment
	F' [N]	4146	7546	11856	17398	31918	51255	73759	117155	169982	Garantierte Schraubkraft
	R [N]	2654	4829	7588	11135	20428	32803	47206	74979	108789	Abzugskraft / pro Segment
10	$\lambda$	39									Empfohlene Segmentlänge
12	[mm]	33	60								oder
14		28	51								Lochabstand
16		25	45	71							
18		22	40	63							
20		20	36	57	83						
22		18	33	52	75						
24		16	30	47	69						
26		15	28	44	64	119					
28			26	41	59	111					
30			24	38	55	104					
32			22	36	52	97	156				
34			21	33	49	91	147				
36				32	46	86	139				
38				30	44	82	131	189			
40				28	41	78	125	180			
42				27	39	74	119	171			
44				26	38	71	113	163			
46					36	68	108	156			
48					35	65	104	150	239		
50					33	62	100	144	230		
52					32	60	96	138	221		
54					31	58	92	133	213		
56						55	89	128	205		
58						54	86	124	198	290	
60						52	83	120	191	280	
62						50	80	116	185	271	
64						49	78	112	179	262	
66						47	76	109	174	254	
68						46	73	106	169	247	
70						44	71	103	164	240	

Beilage 4: Zulässige Seilkraft bei Litzenseilen  
Sicherheitsfaktor = 2.0

IWM Institut für Werkstoff-Fragen und Materialprüfungen

N	Einh.	M6	M8	M10	M12	M16	M20	M24	M30	M36	Bemerkungen
4	S [kN]	5	10	15	22	41	66	94	150	218	Zulässige Seilkraft
5		7	12	19	28	51	82	118	187	272	
6		8	14	23	33	61	98	142	225	326	
7		9	17	27	39	71	115	165	262	381	
8		11	19	30	45	82	131	189	300	435	
9		12	22	34	50	92	148	212	337	490	
10		13	24	38	56	102	164	236	375	544	
11		15	27	42	61	112	180	260	412	598	
12		16	29	46	67	123	197	283	450	653	
13		17	31	49	72	133	213	307	487	707	
14		19	34	53	78	143	230	330	525	762	
15		20	36	57	84	153	246	354	562	816	
16		21	39	61	89	163	262	378	600	870	
17		23	41	64	95	174	279	401	637	925	
18		24	43	68	100	184	295	425	675	979	
19		25	46	72	106	194	312	448	712	1033	
20		27	48	76	111	204	328	472	750	1088	
21		28	51	80	117	214	344	496	787	1142	
22		29	53	83	122	225	361	519	825	1197	
23		31	56	87	128	235	377	543	862	1251	
24		32	58	91	134	245	394	566	900	1305	
25		33	60	95	139	255	410	590	937	1360	
26		34	63	99	145	266	426	614	975	1414	
27		36	65	102	150	276	443	637	1012	1469	
28		37	68	106	156	286	459	661	1050	1523	
29		38	70	110	161	296	476	684	1087	1577	
30		40	72	114	167	306	492	708	1125	1632	
31		41	75	118	173	317	508	732	1162	1686	
32		42	77	121	178	327	525	755	1200	1741	
33		44	80	125	184	337	541	779	1237	1795	
34		45	82	129	189	347	558	803	1275	1849	
35		46	85	133	195	357	574	826	1312	1904	
36		48	87	137	200	368	590	850	1350	1958	
37		49	89	140	206	378	607	873	1387	2013	



Beilage 4: Empfohlene Segmentlänge bei VV-Seilen  
 p=150 MPa

IWM Institut für Werkstoff-Fragen und Materialprüfungen

D	Einh.	M6	M8	M10	M12	M16	M20	M24	M30	M36	Bemerkungen
[mm]	M [Nm]	7.7	18.5	36	63	153	308	529	1053	1825	Empfohlenes Anziehmoment
	F' [N]	4146	7546	11856	17398	31918	51255	73759	117155	169982	Garantierte Schraubkraft
	R [N]	2156	3924	6165	9047	16597	26653	38355	60921	88391	Abzugskraft / pro Segment
10	$\lambda$		24	38							Empfohlene Segmentlänge
12	[mm]			32	46						oder
14				27	39						Lochabstand
16					35	65					
18					31	58					
20						52	83				
22						47	76	109			
24						43	69	100			
26							64	92			
28							59	86	137		
30							55	80	128		
32							52	75	120		
34								70	113	165	
36								67	106	156	
38								63	101	147	
40									96	140	
42									91	133	
44									87	127	
46									83	122	
48									80	117	
50									77	112	
52										108	
54										104	
56										100	
58										97	
60										93	
62										90	
64											
66											
68											
70											

Beilage 4: Empfohlene Segmentlänge bei VV-Seilen  
 p=100 MPa

IWM Institut für Werkstoff-Fragen und Materialprüfungen

D	Einh.	M6	M8	M10	M12	M16	M20	M24	M30	M36	Bemerkungen
[mm]	M [Nm]	7.7	18.5	36	63	153	308	529	1053	1825	Empfohlenes Anziehmoment
	F' [N]	4146	7546	11856	17398	31918	51255	73759	117155	169982	Garantierte Schraubkraft
	R [N]	2156	3924	6165	9047	16597	26653	38355	60921	88391	Abzugskraft / pro Segment
10	$\lambda$	20	36								Empfohlene Segmentlänge
12	[mm]	16	30	47							oder
14			26	41	59						Lochabstand
16			22	36	52						
18				32	46	86					
20				28	41	78					
22				26	38	71					
24					35	65	104				
26					32	60	96				
28						55	89	128			
30						52	83	120			
32						49	78	112			
34						46	73	106	169		
36						43	69	100	159		
38						41	66	95	151		
40							62	90	143		
42							59	86	137	200	
44							57	82	130	191	
46							54	78	125	183	
48							52	75	120	175	
50								72	115	168	
52								69	110	161	
54								67	106	156	
56								64	102	150	
58								62	99	145	
60									96	140	
62									93	135	
64									90	131	
66									87	127	
68									84	123	
70									82	120	

N	Einh.	M6	M8	M10	M12	M16	M20	M24	M30	M36	Bemerkungen
4	S [kN]	4	8	12	18	33	53	77	122	177	Zulässige Seilkraft
5		5	10	15	23	41	67	96	152	221	
6		6	12	18	27	50	80	115	183	265	
7		8	14	22	32	58	93	134	213	309	
8		9	16	25	36	66	107	153	244	354	
9		10	18	28	41	75	120	173	274	398	
10		11	20	31	45	83	133	192	305	442	
11		12	22	34	50	91	147	211	335	486	
12		13	24	37	54	100	160	230	366	530	
13		14	26	40	59	108	173	249	396	575	
14		15	27	43	63	116	187	268	426	619	
15		16	29	46	68	124	200	288	457	663	
16		17	31	49	72	133	213	307	487	707	
17		18	33	52	77	141	227	326	518	751	
18		19	35	55	81	149	240	345	548	796	
19		20	37	59	86	158	253	364	579	840	
20		22	39	62	90	166	267	384	609	884	
21		23	41	65	95	174	280	403	640	928	
22		24	43	68	100	183	293	422	670	972	
23		25	45	71	104	191	307	441	701	1016	
24		26	47	74	109	199	320	460	731	1061	
25		27	49	77	113	207	333	479	762	1105	
26		28	51	80	118	216	346	499	792	1149	
27		29	53	83	122	224	360	518	822	1193	
28		30	55	86	127	232	373	537	853	1237	
29		31	57	89	131	241	386	556	883	1282	
30		32	59	92	136	249	400	575	914	1326	
31		33	61	96	140	257	413	595	944	1370	
32		34	63	99	145	266	426	614	975	1414	
33		36	65	102	149	274	440	633	1005	1458	
34		37	67	105	154	282	453	652	1036	1503	
35		38	69	108	158	290	466	671	1066	1547	
36		39	71	111	163	299	480	690	1097	1591	
37		40	73	114	167	307	493	710	1127	1635	