

Die Beanspruchung der Seilbahnseile



Für alle technisch interessierten Leserinnen und Leser der ISR beschreibt Prof. Dr. Josef Nejez die Kräfte, die auf die Seilbahnseile wirken, sowie die daraus resultierenden Beanspruchungen und Regeln für die Bemessung der Seile.

Univ.-Prov. Dipl.-Ing. Dr. techn.
Josef NEJEZ

Aus der Aufgabenstellung der Seilbahnseile – Tragen, Bewegen und Führen der Fahrzeuge – resultieren Kräfte, die in verschiedener Art auf die Seilbahnseile wirken und sie dadurch beanspruchen.

Um das zu verstehen, ist es notwendig, zu wissen, was eine Kraft ist und durch welche Größen und Eigenschaften eine Kraft beschrieben werden kann. Für jene Leserinnen und Leser, die diese Grundkenntnisse der Physik nicht mehr parat oder in ihrer Ausbildung nicht erworben haben, sind die wichtigsten Grundlagen hierzu im Kasten auf Seite 33 zusammengefasst.

1 KRAFTWIRKUNGEN AUF DIE SEILBAHNSEILE

Wegen der oben genannten Aufgabenstellung der Seilbahnseile müssen die Seilbahnseile Kräfte aufnehmen, die zwei Arten der Beanspruchung der Seilbahnseile bewirken:

- Kräfte, die in Richtung der Seilachse wirken, erzeugen eine Zugbeanspruchung,
- Kräfte, die quer zur Seilachse wirken, erzeugen eine Biegebeanspruchung.

Eine weitere Art der Biegebeanspruchung ist die Biegung von Seilbahnseilen an Seilscheiben, Seilschuhen und Seiltrommeln.

Je nach der Seilfunktion unterscheiden wir Tragseile, Zugseile und Förderseile:

- Tragseile tragen und führen die Fahrzeuge (Zweiseilssystem),
- Zugseile bewegen die Fahrzeuge (Zweiseilssystem),
- Förderseile tragen, bewegen und führen die Fahrzeuge (Einseilssystem).

Abb. 1 zeigt links den Querschnitt eines vollverschlossenen Tragseiles und rechts den Querschnitt eines Rundlitzenseiles, wie es für Zug- und Förderseile verwendet wird.

Vollverschlossene Tragseile haben einen kompakten Aufbau und eine glatte Seiloberfläche und eignen sich daher als Fahrbahn für die Laufwerke von Seilbahnfahrzeugen. Rundlitzenseile mit weicher Einlage sind vergleichsweise biegsam, eignen sich daher für den

Lauf über Seilscheiben, und können zu einer geschlossenen Seilschleife verspleißt werden. Sie werden daher als Zug- und Förderseile eingesetzt.

2 ZUGBEANSPRUCHUNG

Die Zugbeanspruchung wird verursacht durch die in Richtung der Seilachse wirkende Zugkraft, bezeichnet als Seilspannkraft. Die Seilspannkraft setzt sich aus fünf Teilspannkraften mit unterschiedlichen Ursachen zusammen:

- die Grundspannkraft, erzeugt durch eine Spanneinrichtung oder eine Fixverankerung;
- die Höhenspannkraft, resultierend aus dem Eigengewicht des Seiles;
- die Zugwirkung der Fahrzeuge, resultierend aus den Kraftkomponenten der Fahrzeuggewichte in Richtung der Seilachse;
- die Reibungskraft, resultierend aus den Reibungsverlusten an den Seilrollen, Seilscheiben und Seilschuhen, und
- die Trägheitskraft, das sind die Kraftwirkungen aus dem Anfahren und Bremsen.

2.1 GRUNDSPANNKRAFT

Damit die Seilbahnseile die Fahrzeuge freischwebend tragen können, müssen sie ausreichend gespannt werden. Ohne das Spannen würden die Seilbahnseile auf dem Boden aufliegen. Die für die Spannung der Seilbahnseile erforderliche Zugkraft wird als Grundspannkraft bezeichnet.

Die Grundspannkraft von Zug- und Förderseilen wird fast ausschließlich durch die Kolbenkraft einer hydraulischen Spannvorrichtung oder durch die Gewichtskraft einer Spannvorrichtung mit Spanngewicht erzeugt. Die Grundspannkraft von Tragseilen wird durch ein Spanngewicht oder durch Fixverankerung an Verankerungstrommeln (Pollern) erzeugt.

2.2 HÖHENSPANNKRAFT

Die Höhenspannkraft ist die Zunahme der Seilspann-

kraft mit der Höhe zufolge des Eigengewichtes der Seilbahnseile.

Diese Teilspannkraft der Seilspannkraft lässt sich am Beispiel eines frei herabhängenden Seiles erklären. Am unteren Seilende ist die Höhenspannkraft gleich Null, am oberen Ende hängt das Gesamtgewicht des Seiles. Entlang des Seiles nimmt die Höhenspannkraft mit der Höhe linear zu. Wie man mit Hilfe von Rechenmethoden der Statik zeigen kann, gilt das in gleicher Weise für gespannte Seile zwischen Tal- und Bergstation in beliebiger schräg gespannter Lage.

2.3 ZUGWIRKUNG DER FAHRZEUGE

Wir betrachten der Einfachheit halber hier nur die Situation bei Umlaufbahnen. Hängt ein Seilbahnfahrzeug mit seiner Klemme an einem geneigten Zug- oder Förderseil, so muss die talwärts gerichtete Komponente des Fahrzeuggewichts (Hangabtriebskraft) vom Zug- oder Förderseil aufgenommen werden (Abb. 2). Diese Komponente des Fahrzeuggewichts erhöht an jeder Fahrzeugklemme die Seilspannkraft im Zug- oder Förderseil.

Die Summe der Hangabtriebskräfte der Fahrzeuge eines Zug- oder Förderseilstranges wird als Zugwirkung der Fahrzeuge bezeichnet.

Die Zugwirkung der Fahrzeuge hängt von der Fahrzeuganzahl, dem Eigengewicht und der Beladung der Fahrzeuge sowie der Förderseilneigung ab: Je mehr Fahrzeuge, je schwerer die Fahrzeuge, je größer die Beladung und je steiler die Bahn, desto größer ist die Zugwirkung.

2.4 REIBUNGSKRAFT

An den Unterstützungspunkten und Umlenkungen der Seilbahnseile, das sind die Seilrollen, Seilscheiben und Seilschuhe, treten verschiedene Arten von Reibungskräften auf. Sie wirken entgegen der Bewegungsrichtung des Seiles. Je nach Bewegungsrichtung des Zug- oder Förderseiles (Bergfahrt – Talfahrt) erhöhen oder verringern diese Reibungskräfte die Seilspannkraft und werden, getrennt für die beiden Seilstränge, als Reibungskraft bezeichnet.

2.5 TRÄGHEITSKRAFT

Beim Anfahren (Beschleunigung) und Bremsen (Verzögerung) treten wegen der Trägheit der bewegten Massen (Fahrzeuge, Zug- oder Förderseil) dynamische Kräfte auf, die beim Beschleunigen entgegen der Bewegungsrichtung wirken, beim Bremsen wirken sie in der Bewegungsrichtung (vergleiche die Situation beim Auto). Beim Anfahren (Beschleunigung) wird durch die Trägheitskraft auf der Bergfahrtseite die Seilspannkraft erhöht und auf der Talfahrtseite verringert, beim Bremsen (Verzögerung) wird auf der Bergfahrtseite die Seilspannkraft verringert, auf der Talfahrtseite erhöht.

Die Trägheitskraft hängt von der Masse der Fahrzeuge einschließlich Beladung und des Förderseiles sowie vom Beschleunigungs- bzw. Verzögerungswert beim Anfahren bzw. Bremsen ab.

2.6 MINIMALE UND MAXIMALE SEILSPANNKRAFT

Für die Bemessung der Seilbahnseile und vieler anderer Bauteile der Seilbahn ist die Kenntnis der minimalen und maximalen Seilspannkraft der Seile notwendig. Diese Extremwerte der Seilspannkraft in jedem Seilstrang ergeben sich aus dem kleinsten bzw. größten Wert der Summe über die fünf oben genannten Teilspannkräfte. Wegen der Höhenspannkraft und bei Zug- und Förderseilen wegen der Zugwirkung der Fahrzeuge tritt die minimale Seilspannkraft immer in der Talstation auf und die maximale Seilspannkraft immer in der Bergstation.

3 BIEGEBEANSPRUCHUNG

Die Seilbahnseile werden auf zwei Arten auf Biegung beansprucht: Durch Kräfte, die quer zur Seilachse wirken (Querkräfte), und durch Biegung an den Seilscheiben (Zug- und Förderseile) sowie an Seilschuhen und Trommeln (Tragseile). In beiden Fällen wird in den Seilbahnseilen ein Biegemoment erzeugt.

Die Arten der Biegebeanspruchung werden im Folgenden am Beispiel des Förderseiles beim Einseil-Umlaufbahnsystem gezeigt. Bei Zug- und Tragseilen sind die Verhältnisse ähnlich.

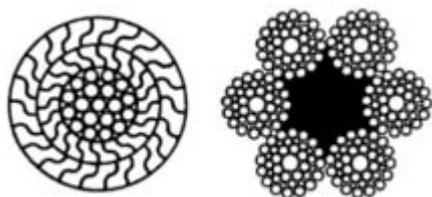


Abb. 1: Querschnittszeichnung eines vollverschlossenen Tragseiles (links) und eines Rundlitzenseiles für Zug- und Förderseile (rechts)

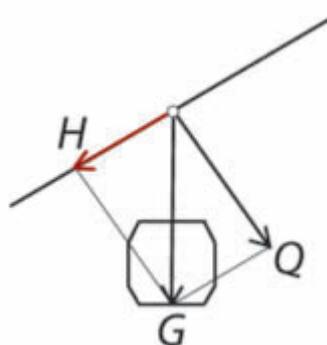


Abb. 2: Zugwirkung eines Seilbahnfahrzeugs
G ... Fahrzeuggewicht
H ... Kraftkomponente in Seilrichtung (Hangabtriebskraft)
Q ... Querkraft

3.2 BIEGEBEANSPRUCHUNG DURCH QUERKRÄFTE

Auf das Förderseil wirken folgende Querkraften: An den Klemmen der Fahrzeuge wirkt die Kraftkomponente des Fahrzeuggewichtes im rechten Winkel zur Seilachse als Querkraft (Klemmen-Querkraft, Abb. 3, 3a).

An den Förderseilrollen der Stützen und Stationen wirken die Rollenlasten als Querkraft (Rollen-Querkraft, Abb. 4, 4a).

Die Auswirkung der Biegebeanspruchung auf das Förderseil hängt nicht nur von der Querkraft, sondern auch von der Seilspannkraft am Angriffspunkt der Querkraft ab. Je größer die Querkraft im Verhältnis zur Seilspannkraft ist, desto ungünstiger wirkt sich die Biegebeanspruchung auf das Förderseil aus.

3.3 BIEGEBEANSPRUCHUNG AN SCHEIBEN

Durch die Umlenkung des Förderseiles an Seilscheiben wird das Seil auf Biegung beansprucht. Es kommt dabei auf das Verhältnis Scheibendurchmesser zu Seildurchmesser an (Abb. 5).

Je kleiner der Scheibendurchmesser im Verhältnis zum Seildurchmesser ist, desto größer ist die Biegebeanspruchung des Förderseiles an der Scheibe. Die Biegebeanspruchung des Förderseiles an den Scheiben ist die Hauptursache für das Entstehen von Dauerbrüchen der Seildrähte und damit maßgeblich für die Lebensdauer des Förderseiles.

4 BEMESSUNG DER FÖRDERSEILE

Um die Sicherheit des Förderseiles gegen Bruch und eine wirtschaftlich sinnvolle Lebensdauer des Förderseiles zu gewährleisten, wird in den Seilbahnnormen für die oben genannten Beanspruchungen jeweils ein Sicherheitsfaktor festgelegt: Für die Zugbeanspruchung ist dies der Zugsicherheitsfaktor, für die Biegebeanspruchung durch Querkraften ist dies der Querkraftfaktor (wurde früher Querbelaastungsverhältnis genannt), für die Biegebeanspruchung an Seilscheiben ist dies das Krümmungsverhältnis D/d (wurde früher Durchmesser Verhältnis genannt).

4.1 ZUGSICHERHEITSAKTOR

Der Zugsicherheitsfaktor ist definiert als Quotient aus der Mindestbruchkraft des Seilbahnseiles und der Seilspannkraft.

Beispiel Förderseil:

- Der Zugsicherheitsfaktor darf den Wert 4,0 nicht unterschreiten.
- Der kleinste Zugsicherheitsfaktor tritt an der Stelle mit der maximalen Seilspannkraft auf, das ist immer in der Bergstation.
- Der Zugsicherheitsfaktor darf für Förderseile mit Langspleiß den Wert 20 nicht überschreiten.
- Der größte Zugsicherheitsfaktor tritt an der Stelle mit der minimalen Seilspannkraft auf, das ist immer in der Talstation.

4.2 QUERKRAFTFAKTOR

Der Querkraftfaktor ist definiert als Quotient aus der Seilspannkraft und der Querkraft.

Beim Förderseil ist dies die Klemmen-Querkraft bzw. die Rollen-Querkraft.

- Beim Förderseil darf der Querkraftfaktor für die Klemmen-Querkraft und für die Rollen-Querkraft den Wert 15 nicht unterschreiten.
- Der kleinste Querkraftfaktor tritt an der Stelle mit der minimalen Seilspannkraft auf, das ist immer in der Talstation.
- Beispiel Klemmen-Querkraft: Für ein Seilbahnfahrzeug mit einem Gesamtgewicht von 5,0 kN muss die Seilspannkraft in der Talstation mindestens 75 kN betragen.
- Beispiel Rollen-Querkraft: An jeder Stütze der Seilbahntrasse darf die maximale Rollenlast nicht größer sein als 1/15 der an dieser Stelle auftretenden minimalen Seilspannkraft.

4.3 KRÜMMUNGSVERHÄLTNIS

Das Krümmungsverhältnis ist definiert als Quotient aus dem Seilscheibendurchmesser und dem Durchmesser des Förderseiles.

- Das Krümmungsverhältnis darf bei Förderseilen den

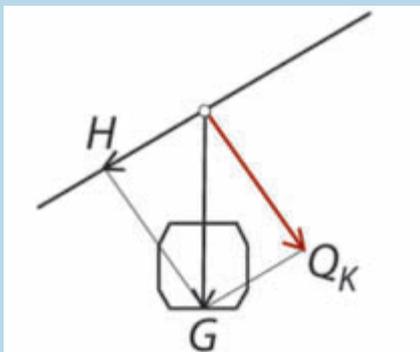


Abb. 3: Biegebeanspruchung des Förderseiles an der Klemme eines Seilbahnfahrzeugs
G ... Fahrzeuggewicht
H ... Kraftkomponente in Seilrichtung (Hangabtriebskraft)
Q_K ... Klemmen-Querkraft

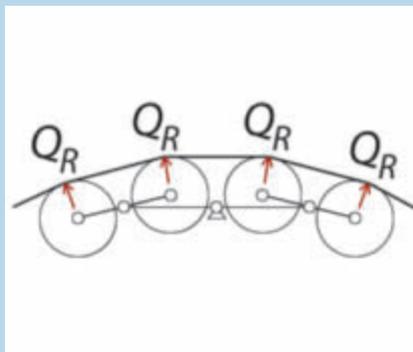


Abb. 4: Biegebeanspruchung des Förderseiles an den Rollen einer Rollenbatterie
Q_R ... Rollen-Querkraft

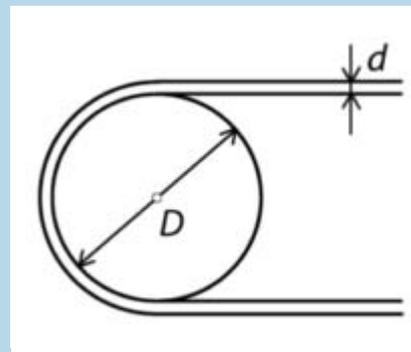


Abb. 5: Biegebeanspruchung des Förderseiles an einer Seilscheibe
D ... Seilscheibendurchmesser
d ... Förderseildurchmesser

Wert 80 nicht unterschreiten.

- Beispiel: Für ein Förderseil mit 50 mm Durchmesser beträgt demnach der kleinste Seilscheibendurchmesser 4,00 m.

5 ZUSAMMENFASSUNG

In den Abschnitten 1 bis 3 wurden die verschiedenen Arten der Beanspruchung von Seilbahnseilen besprochen und im Abschnitt 4 am Beispiel des Förderseiles beim Einseil-Umlaufbahnsystem die daraus resultierenden Bemessungsregeln im Prinzip beschrieben. Für Trag- und Zugseile bestehen ähnliche Regeln. Genauere Bestimmungen sind den einschlägigen Seilbahnnormen zu entnehmen.

Josef Nejez



Abb. 3a: Biegebeanspruchung des Förderseiles an der Klemme eines Seilbahnfahrzeugs. Q_K ... Klemmen-Querkraft



Abb. 4a: Biegebeanspruchung des Förderseiles an den Rollen einer Rollenbatterie. Q_R ... Rollen-Querkraft

IM ÜBERBLICK

Basiswissen zum Kraftbegriff in der Statik

Die Kraft ist eine physikalische Größe. Die Wirkung der Kraft besteht darin, dass sie einen frei beweglichen Körper in Bewegung setzt. Die Kraft wird durch folgende Bestimmungsstücke festgelegt (Abb. 1):

- Betrag, angegeben in Newton (N),
- Richtung, angegeben durch die Wirkungslinie,
- Richtungssinn auf der Wirkungslinie,
- Angriffspunkt.

Die Kraft wird üblicherweise mit dem Buchstaben F bezeichnet (F ... englisch: force). Die zeichnerische Darstellung der Kraft erfolgt als Pfeil (Vektor):

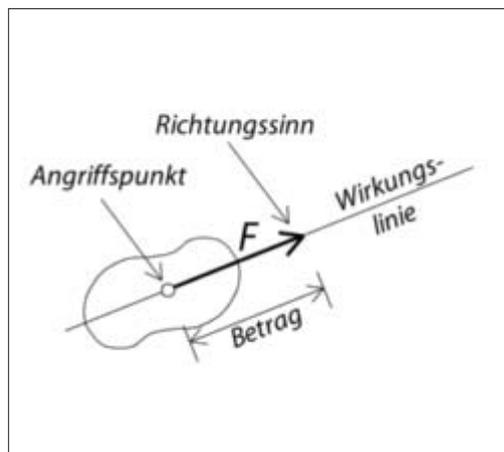


Abb. 1: Bestimmungsstücke der Kraft F

Zusammensetzen mehrerer Kräfte

Wirken auf einen Körper mehrere Kräfte, kann man die Kräfte zu einer resultierenden Kraft zusammensetzen. Diese Kraft wird als Resultierende bezeichnet. Gleichgerichtete Kräfte auf der selben Wirkungslinie werden betragsmäßig addiert, gegengerichtete Kräfte auf der selben Wirkungslinie werden betragsmäßig subtrahiert, Kräfte mit verschiedenen Wirkungslinien werden vektormäßig zu einem Kräfteparallelogramm (Abb. 2) zusammengesetzt.

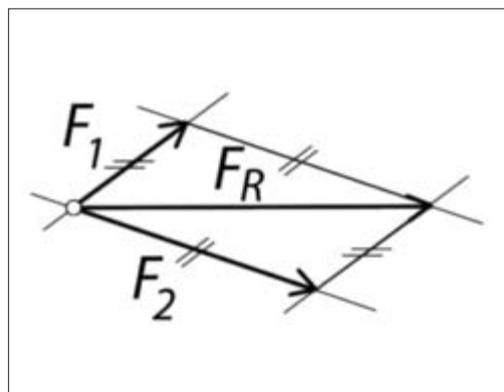


Abb. 2: Vektormäßige Zusammensetzung zweier Kräfte: Kräfteparallelogramm
F1 ... Kraft 1
F2 Kraft 2
FR ... Resultierende

Zerlegung einer Kraft

Die Kraft kann man in zwei Kräfte zerlegen (entgegengesetzter Vorgang zum Zusammensetzen von Kräften). Diese Kräfte werden als Kraftkomponenten bezeichnet. Die Summe der Komponenten ergibt die ursprüngliche Kraft und hat die gleiche Wirkung. Beispielsweise kann die Gewichtskraft eines Körpers auf einer schiefen Ebene in Hangabtriebskraft und Normalkraft zerlegt werden (Abb. 3).

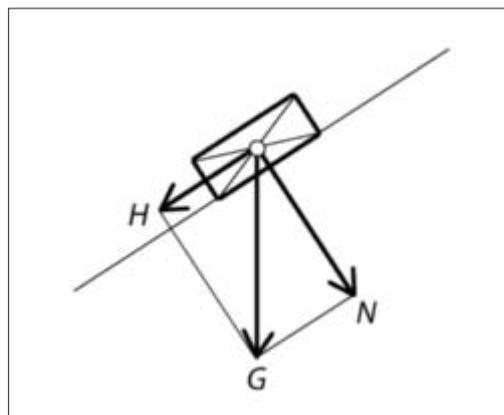


Abb. 3: Körper auf schiefer Ebene
G ... Gewichtskraft
H ... Hangabtriebskraft
N ... Normalkraft

Weiterführende Begriffe und Methoden der Statik

Neben dem Zusammensetzen von Kräften und Zerlegen von Kräften in Komponenten sind für die Behandlung der Statik von Seilbahnseilen noch weitere Begriffe und Methoden erforderlich, auf die hier nicht näher eingegangen werden kann. Es sind dies insbesondere:

- Gesetz von Aktion und Reaktion (jeder Kraft entspricht eine gleich große, gegengerichtete Reaktionskraft auf der selben Wirkungslinie),
- Gleichgewichtsbedingungen (die Summe aller Kräfte, die auf einen Körper wirken, muss Null sein, damit der Körper in Ruhe bleibt),
- Schnittprinzip (Methode zur Bestimmung der in einem Körper wirkenden inneren Kräfte).