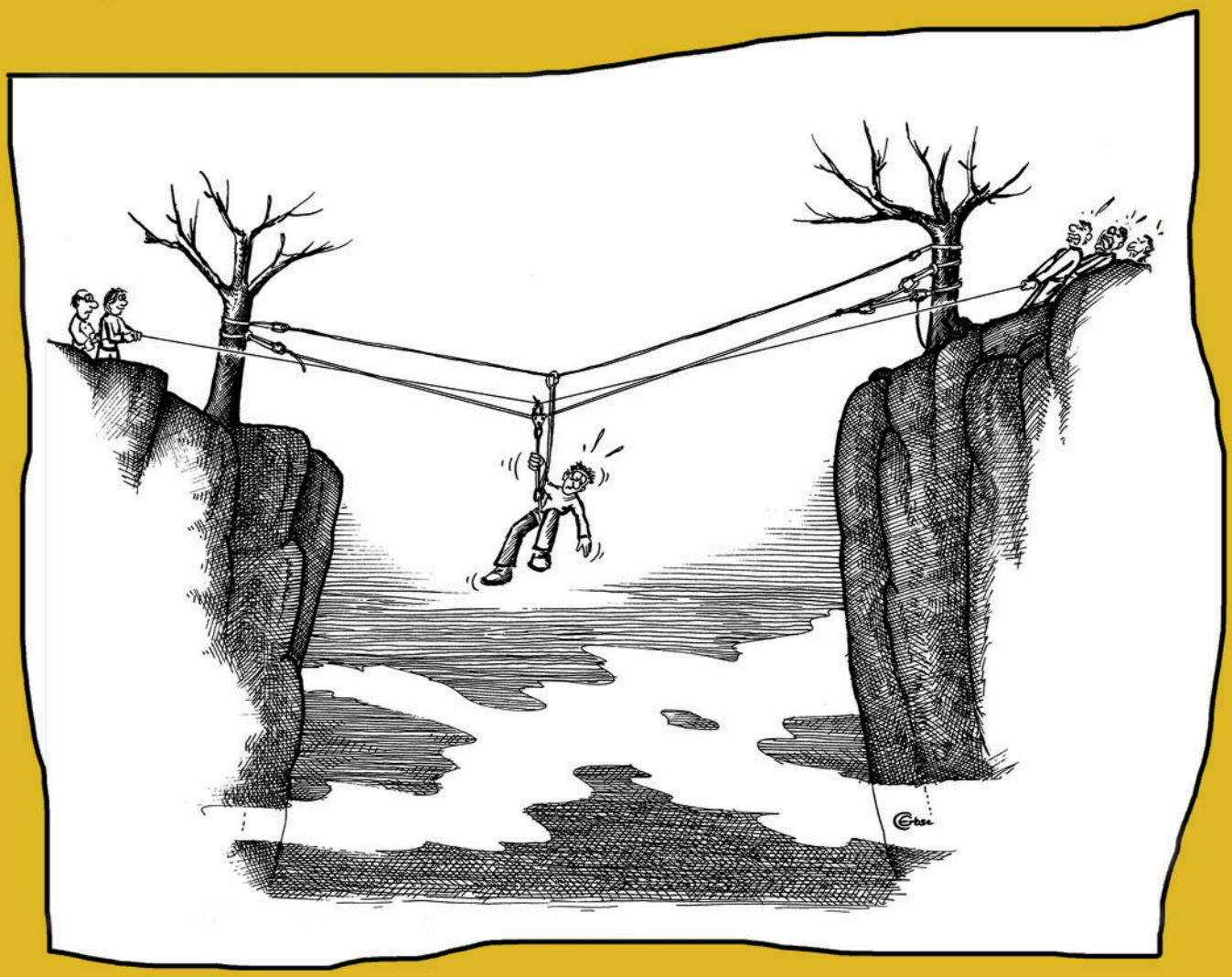
spannende seile



Die Belastung horizontal gespannter Seile von Klaus Kunigham

Sicherheitshalber verlegt ein Tourenführer ein waagerecht verlaufendes Fixseil am ausgesetzten Grat. Der Canyoning Guide bietet seinen Gästen ein weiteres Erlebnis mit der Befahrung einer Seilrutsche. Einsatzkräfte retten einen Verletzten mittels einer waagerechten Seiltraverse. Ein Sondereinsatzkommando überwindet hangelnd eine Häuserschlucht. Bei einem Outdoortraining baut eine Hand voll Manager eine Seilbrücke über einen Bach. Halten die Seile? Dieser Frage widmet sich Klaus Kunigham im folgenden ersten Teil einer Serie über gespannte Seile.

Dipl. Ing. / Dipl. Sportlehrer Klaus Kunigham, 40, studierte Maschinenbau, Physik und Sportwissenschaft und arbeitet als Berater und Trainer vorwiegend für Führungskräfte und Teams.

In allen genannten Beispielen sind Berg- oder Statikseile im Einsatz. Daran ist nichts Ungewöhnliches zu erkennen, denn das ist in vielen Bereichen alltägliche Praxis. Meistens ist es dabei angenehm, wenn der Durchhang der belasteten Seile möglichst gering ist. Also werden die Seile mehr oder weniger stark während des Aufbaus vorgespannt.
Seile, die nicht reißen, wenn sie Stürze von Kletterern auffangen, werden auch eine Person aushalten, die im waagerecht gespannten Seil hängt. Außerdem wird heute in den allermeisten Fällen redundant aufgebaut. Das heißt, die Belastung wird zusätzlich auf ein zweites Seil verteilt. Kein Problem, sollte man glauben, doch schlagen wir im Physikbuch das Kapitel Kräftedreiecke auf, sehen wir, dass auch relativ geringe Belastungen, wenn sie flachwinklig aufgeteilt werden, in ihrer Wirkung große Kräfte entfalten. Aus diesem Grund soll ja auch der Winkel am Zentralpunkt in einem Kräftedreieck eines Standplatzes nicht größer als 90° sein.

Um geringe Durchhänge an waagerecht gespannten Seilen zu verwirklichen, werden die Tragseile häufig ordentlich vorgespannt. Unbelastet hängen die Seile nun annähernd waagerecht. Bei Belastung mit einer Person entsteht ein Durchhang. Ganz unabhängig von der Vorspannung des Seiles lassen sich aus den geometrischen Daten, Brückenlänge, Durchhang und statische Belastung (Gewicht der Person am Seil) die auftretenden Kräfte auf die Fixpunkte, an denen das Seil befestigt ist, berechnen. Je geringer der Durchhang, desto größer die Reaktionskräfte bei ein und derselben Belastung. Und wie in Abbildung 1 dargestellt, wachsen die Reaktionskräfte bei abnehmendem Durchhangwinkel α (Alpha) immer schneller an.

Beispiel: Wir betrachten eine Seilbrücke mit einem 11 mm Statikseil von 19 m Spannweite, die mit einer Person (80 kg) in der Mitte belastet wird. Den Durchhang schätzen wir auf 1,5 m. Damit ergibt sich ein h/l = 1,5 m/19 m von ca. 0,08. Aus der Tabelle bei Abbildung 1 können wir dann ablesen, dass der Durchhangwinkel α ca. 9° beträgt. Aus der Tabelle oder der Abbildung 1 lässt sich dann als Reaktionskraft das gut Dreifache der Last ermitteln. Die Reaktionskräfte werden bei dem konkreten Fall also ca. 3,2 x 80 kg = 256 kg betragen. (Die Maßeinheit kg gibt physikalisch die Masse an. Richtig würde es heißen, die Reaktionskräfte liegen bei ca. 2500 N)

Belastungsprognose

Schwieriger wird es dann, wenn man nicht aufgrund eines aufgetretenen Durchhanges auf die Reaktionskräfte schließen möchte, sondern Voraussagen dazu machen will, wie sich unterschiedliche Systeme bei verschiedenen Belastungen verhalten. Die variablen Parameter sind hier im Wesentlichen das Dehnungsverhalten der eingesetzten Seile, die aufgebrachten Vorspannungen auf die Seile und die Lasten, die an der Seilbrücke hängen. Um Aussagen über die zu erwartenden Durchhänge und Reaktionskräfte zu machen, müsste man eine Vielzahl von Messungen durchführen. Praktikabler erscheint es da, die Situation mathematisch zu erfassen, entsprechend zu programmieren, um dann Variationen der Variablen einfach simulieren zu können. Aus diesen Erkenntnissen können dann Aussagen und Empfehlungen zum Aufbau oder zu den verwendeten Materialien abgeleitet werden. Folgende Situation wurde berechnet: Auf ein vorgespanntes Seil mit einer Länge l_1 wird in der Mitte eine Kraft F_L aufgebracht. Das Seil dehnt sich durch die Last und es kommt zu einem Durchhang h. Aus der Geometrie ergeben sich zwangsläufig die Reaktionskräfte F_R an den Fixpunkten. Die Länge des gedehnten Seiles beträgt dann l_1.

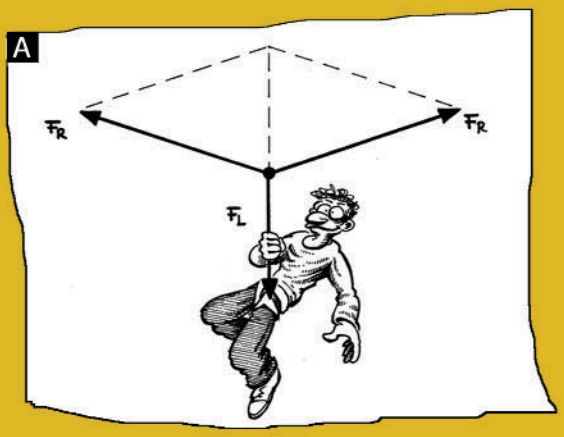
Angenommene Randbedingungen

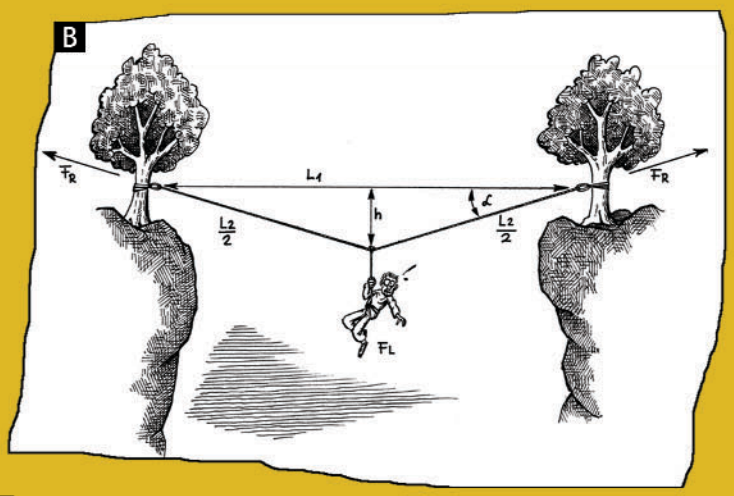
Das Seil ist waagerecht gespannt; bei der Belastung dehnt sich nur das Seil (l_1), ein Zusammenziehen der Knoten wird nicht berücksichtigt; die Fixpunkte sind starr; das Seilgewicht wird vernachlässigt; das Seil im Belastungsbereich $F_R < 8$ kN folgt dem Hook´schen Gesetz ($\delta F = \delta l \times c_s$); das Seil hängt frei und es kommt nicht zu einem zusätzlichen Kanteneinfluss; die Last F_L hängt statisch im Seil; es wird ein neues Seil verwendet.
Nachdem das theoretische Modell stand, war die erste Frage, ob sich die berechneten Werte durch Messungen bestätigen lassen. In den Auswertungen stellte sich durchwegs heraus, dass die Korrelation zwischen Berechnung und Messung sehr gut ist. Damit lassen sich Aussagen aus den Variantenrechnungen mit hinreichender Genauigkeit für praktische Aussagen nutzen. Die Berechnungen zeigen auch, dass sich die Spannweite der Brücke nicht auf den Durchhangwinkel und die Reaktionskräfte auswirkt. Aus diesem Grund ist in den folgenden Abbildungen der Durchhang h auf die Spannweite l normiert. Die Abbildungen können also für alle Spannweiten verwendet werden.

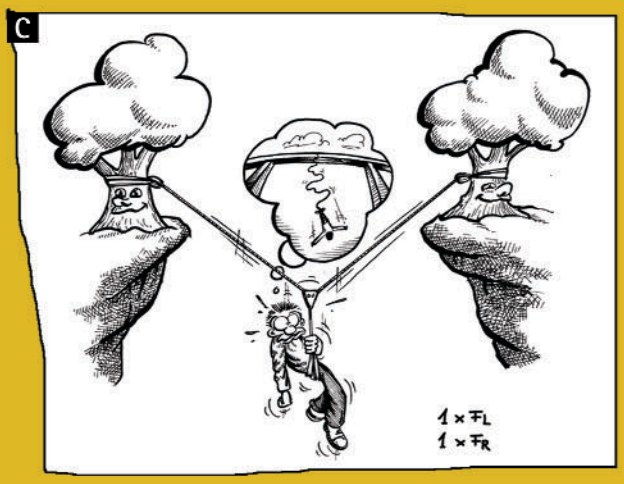
Durchhang in Abhängigkeit von Vorspannung und Last

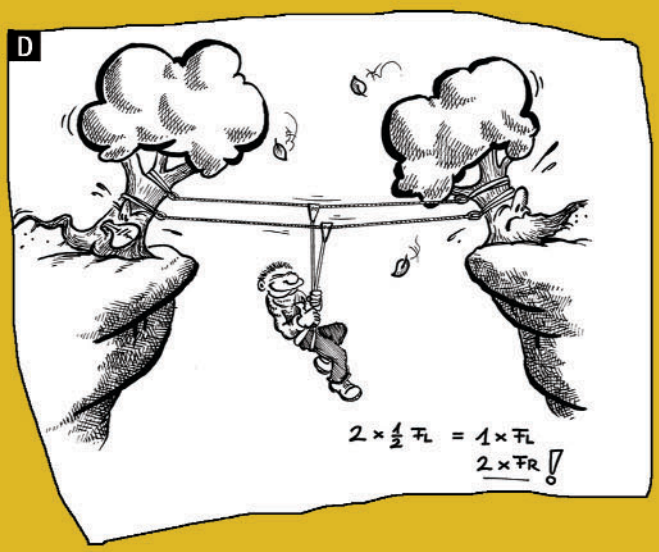
Zuerst wurde untersucht, wie sich unterschiedliche Vorspannungen und Belastungen bei verschiedenen Seiltypen 11 mm verhalten (die folgenden Diagramme sind alle für 11 mm Statik- bzw. dynamische Bergseile gerechnet). Dabei stand natürlich erst einmal die Frage im Raum, wie stark sich Statikseile von dynamischen Bergseilen unterscheiden. Aber auch Unterschiede innerhalb der Gruppe der Statikseile bzw. Bergseile wurden untersucht. Die Ergebnisse in Abbildung 2 zeigen, dass die in der Praxis auftretenden Abweichungen im Dehnungsverhalten innerhalb der Gruppen Statikseile bzw. dynamische Bergseile für den praktischen Einsatz irrelevant sind. Selbst die Unterschiede zwischen den Gruppen sind erstaunlich gering. Vor allem dann, wenn die Vorspannungen 1-2 kN übersteigen.

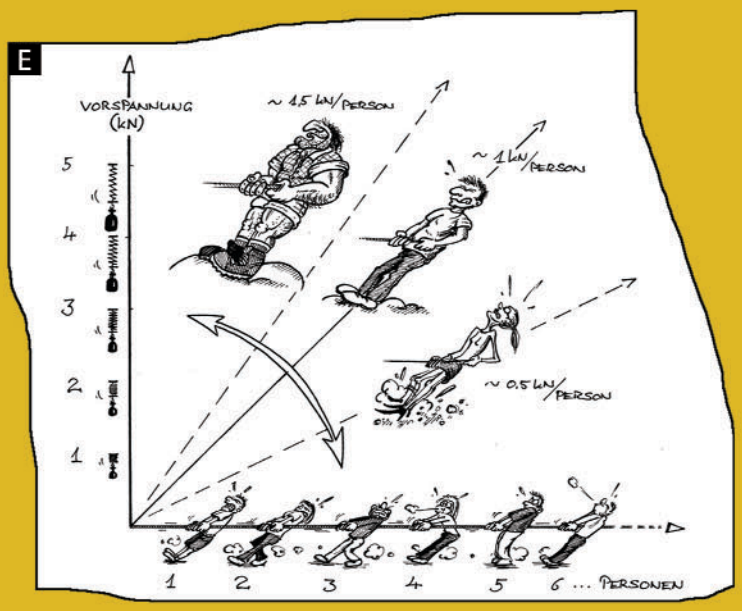
A Vektoren. Auch relativ geringe Kräfte (Last F_L) können, wenn sie flachwinklig aufgeteilt werden, große Kräfte (Reaktionskraft F_R) zur Wirkung haben. Und je flacher der Winkel, desto größer sind die Reaktionskräfte bei gleicher Last.
B Kräfte. Modell für die theoretische Berechnung einer Seilbrücke. Auf ein vorgespanntes Seil mit einer Länge l_1 wird in der Mitte eine Kraft F_L aufgebracht. Das Seil dehnt sich durch die Last und es kommt zu einem Durchhang h. Aus der Geometrie ergeben sich zwangsläufig die Reaktionskräfte F_R an den Fixpunkten. Die Länge des gedehnten Seils beträgt dann l_2.
C FL-FR einfach. Seilbrücken mit einem Seil weisen größere Durchhänge auf als redundant gebaute Brücken. Die Reaktionskraft ist dabei nicht wesentlich größer als die Reaktionskräfte in beiden Seile bei redundantem Aufbau.
D FL-FR redundant. Ein redundanter Aufbau verringert den Durchhang spürbar. Allerdings sind die Reaktionskräfte in beiden Seilen annähernd so groß wie bei einem Aufbau mit einem Seil.
E Diagramm. Die erreichbaren Vorspannkräfte hängen in erster Linie von den Personen ab, die am Seil ziehen. Je nach Untergrund und Person lassen sich ca. 0,5 bis 1,5 kN pro Person an Vorspannung erzielen.











Illustrationen: ERBSE

Beispiel: Eine Seilbrücke, aufgebaut mit einem 11 mm Statikseil, wird schon recht ordentlich mit ca. 3 kN (3 kN entsprechen einer Masse von ca. 300 kg) vorgespannt und mit einer Person von ca. 80 kg Gewicht in der Mitte belastet. Dann ergibt sich nach der Abbildung 2 ein h/l von ca. 0,06. Bei einer Spannweite der Brücke von angenommenen 25 m, ergibt sich dann ein Durchhang von h = l x 0,06 = 25 m x 0,06 = 1,5 m. Die Reaktionskräfte (Abbildung 3) werden ca. 3,3 kN betragen. Wenn die Person wippt, können es auch leicht 5-6 kN werden.

Fazit: Unterschiedliche Statikseile mit gleichem Durchmesser, aber auch dynamische und statische Seile mit gleichem Durchmesser unterscheiden sich im Einsatz als Tragseile einer Seilbrücke bei einer Belastung mit einer Person nur geringfügig. Bei Vorspannungen ab ca. 2 kN sind die Unterschiede praktisch nicht mehr relevant!

Reaktionskräfte in Abhängigkeit von Vorspannung und Last

Für die praktische Handhabung von Seilbrücken ist unter anderem ein geringer Durchhang wünschenswert. Aus dem Blickwinkel der Sicherheit sind darüber hinaus die aus der Vorspannung und Belastung der Seilbrücke resultierenden Reaktionskräfte zu beachten. Aus Sicherheitsgesichtspunkten sind geringe Reaktionskräfte vorteilhaft. In Abbildung 3 ist der berechnete Zusammenhang dargestellt.

Wie zu erwarten steigen mit zunehmender Vorspannung die Reaktionskräfte auf eine Belastung der Brückenseile. Allerdings verändert sich der relative Unterschied zwischen der Belastung und der Reaktionskraft mit zunehmender Vorspannung enorm. Spannt man das Seil z.B. mit 1 kN vor und belastet es mit 0,8 kN (ca. 80 kg), so ergeben sich bei einem Statikseil Reaktionskräfte von ca. 1,6 kN, also ungefähr das Doppelte der Belastung. Spannt man das Seil aber mit z.B. 6 kN vor und belastet es wieder mit 0,8 kN, so werden die Reaktionskräfte unwesentlich über der Vorspannung von 6 kN liegen. Die Unterschiede zwischen statischen und dynamischen Seilen erweisen sich als untergeordnet.
In Abbildung 4 sind einige Messergebnisse dargestellt. Die gemessenen Werte korrelieren mit den berechneten Werten recht gut, wenn man berücksichtigt, dass die gemessenen Belastungen nicht immer ganz genau den Vorgaben der Berechnung von F_L = 0,8 kN bzw. 1,6 kN entsprechen. Auffallend sind die hohen Reaktionskräfte bei wippenden Personen. Insbesondere bei großen Vorspannungen übersteigen die Reaktionskräfte die Vorspannungen enorm und erreichen Werte, die durchaus eine Gefahr für das Seil darstellen können (mehr dazu im zweiten Teil im folgenden Heft). Um noch einmal daran zu erinnern: Das erstellte Rechenmodell für Seilbrücken und die hier vorgestellten Ergebnisse gelten nur für statische oder quasistatische Belastungen. Werden auf vorgespannte Seile dynamische Belastungen aufgebracht wie z.B. durch Wippen oder das Auffangen eines Sturzes, so treten deutlich höhere Reaktionskräfte auf. Bei dynamischen Belastungen liegt das Interesse neben den maximal auftretenden Kräften (Fangstoß) vor allem auch beim Energieaufnahmevermögen des Gesamtsystems.

Fazit: Bei den Reaktionskräften sind die Unterschiede zwischen Statik- und Dynamikseilen mit gleichen Durchmessern (11 mm) für die Praxis nicht relevant. Bei größeren Vorspannungen ab ca. 3 kN liegen die Reaktionskräfte bei Belastungen mit 1-2 Personen in der Größenordnung der Vorspannung. Eine Ausnahme bildet starkes Wippen der Last. Dadurch können weitaus höhere Belastungen als die Vorspannung auftreten!

Durchhang und Reaktionskräfte bei redundantem Aufbau

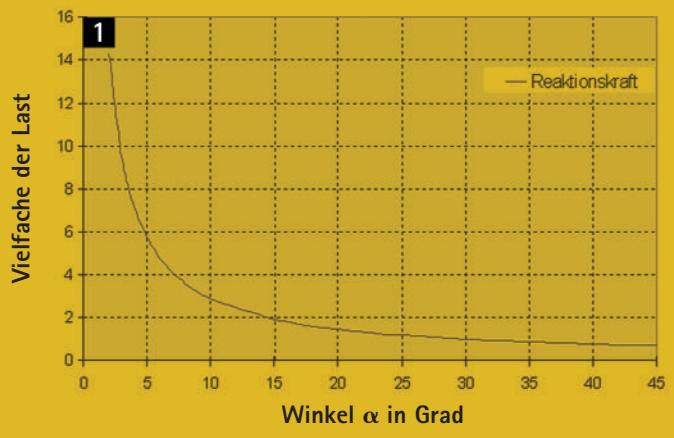
Die bis jetzt genannten Aussagen aus den Berechnungen sind alle von einem Tragseil (11 mm Seil) ausgegangen. Heute werden in der Regel allerdings redundante Aufbauten eingesetzt. Insbesondere nach der Rechtsprechung zum Fall Kanzianiberg sollten auch aus rechtlicher Sicht bei Seilbrücken ausschließlich redundante Aufbauten zum Einsatz kommen. Dass ein redundanter Aufbau nicht alleine aus Festigkeitsgründen sondern auch bezüglich der Prozesssicherheit Sinn macht, wurde an anderer Stelle ausführlich erläutert (siehe bergundsteigen 2-03, Seite 34 - 41). Hier ist nur wichtig, dass in der Regel zwei Tragseile zum Einsatz kommen. Dabei gibt es die Möglichkeit, ein zweites Tragseil vollkommen unbelastet als redundantes System einzusetzen.
In den allermeisten Fällen werden aber in der Praxis beide Tragseile gleichzeitig belastet. Praktisch heißt das, dass eine Person in zwei unabhängig voneinander aufgebauten Tragseilen gleichzeitig eingehängt wird und diese Seile dann auch entsprechend belastet. Geht man davon aus, dass beide Tragseile (zweimal 11 mm Seil) gleich belastet und auch gleich vorgespannt sind, so ergeben sich Durchhänge und Reaktionskräfte, wie sie in den Abbildungen 5 und 6 dargestellt sind.

Beispiel: Die Seilbrücke aus dem obigen Beispiel (25 m Spannweite, Vorspannung 3 kN, Belastung in der Mitte ca. 80 kg (0,8 kN)) wird nun redundant mit zwei 11 mm Statikseilen aufgebaut. Aus Abbildung 5 ergibt sich dann ein h/l von ca. 0,03 und damit ein Durchhang von ca. 25 m x 0,03 = 0,8 m. Im Vergleich zu einem Seil also fast eine Halbierung des Durchhangs. Die Reaktionskräfte (in beiden Seilen!) stellen sich nach Abbildung 6 bei ca. 3,1 kN ein. Praktisch sind beide Seile annähernd gleich stark belastet wie das einfache Seil. Diese paradox klingende Aussage folgt aus dem komplexen Zusammenspiel von zwar sinkenden Lasten auf die Tragseile (denn jedes Seil muss praktisch nur noch eine "halbe" Person tragen) aber dafür flacher werden-

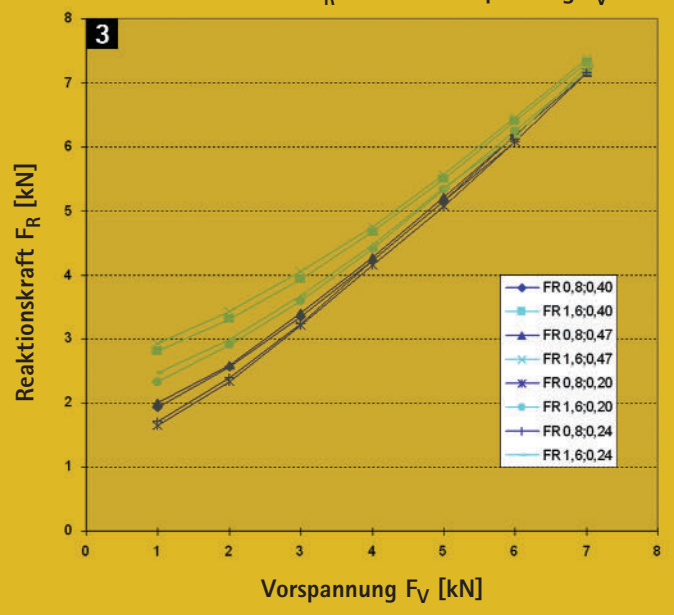
1 Abhängigkeit der Kräfte auf die Fixpunke einer Seilbrücke vom Durchhangwinkel h = Durchhang des Seiles bei mittiger Belastung in m, l_1 = Spannweite der Seilbrücke in m, α = Durchhangwinkel in Grad, F_R = Reaktionskraft

h/l_1	α	F_R	h/l_1	α	F_R
0,017	2°	$14{,}33 \cdot F_L$	0,182	20°	$1{,}46 \cdot F_L$
0,035	4°	$7{,}17 \cdot F_L$	0,233	25°	$1{,}18 \cdot F_L$
0,052	6°	$4{,}78 \cdot F_L$	0,289	30°	$1{,}00 \cdot F_L$
0,070	8°	$3{,}59 \cdot F_L$	0,350	35°	$0{,}87 \cdot F_L$
0,088	10°	$2{,}88 \cdot F_L$	0,420	40°	$0{,}78 \cdot F_L$
0,134	15°	$1{,}93 \cdot F_L$	0,500	45°	$0{,}71 \cdot F_L$

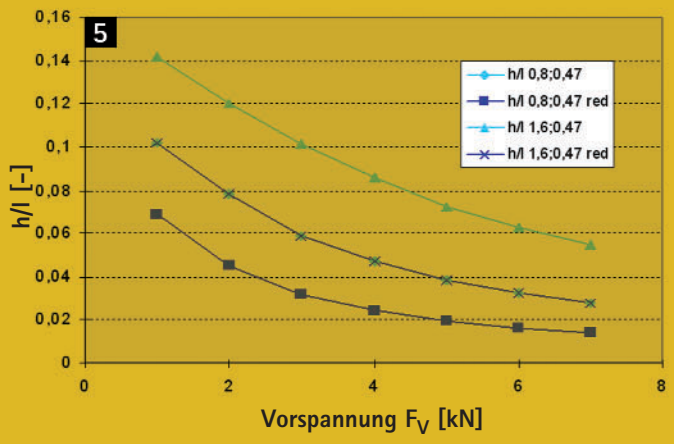
Kräfte auf Fixpunkte und Tragseil



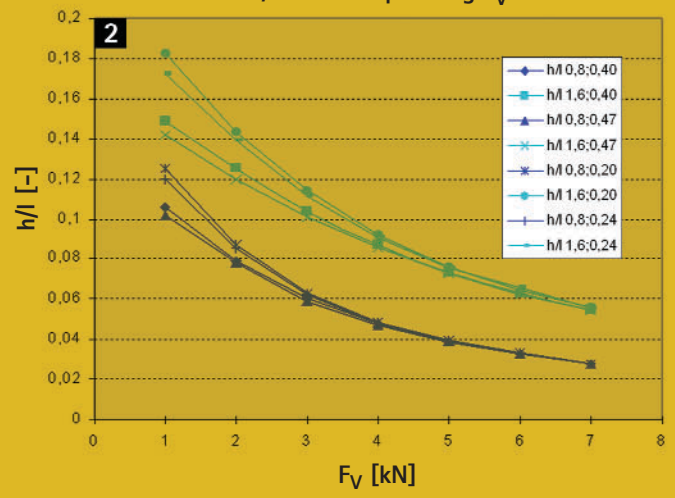
Reaktionskräfte F_R über der Vorspannung F_V



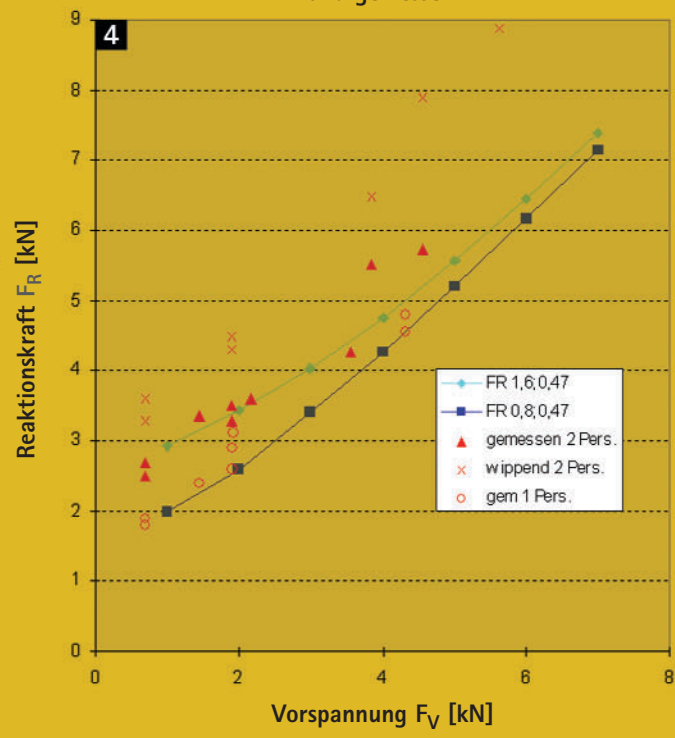
h/l [-] redundant und nicht redundant



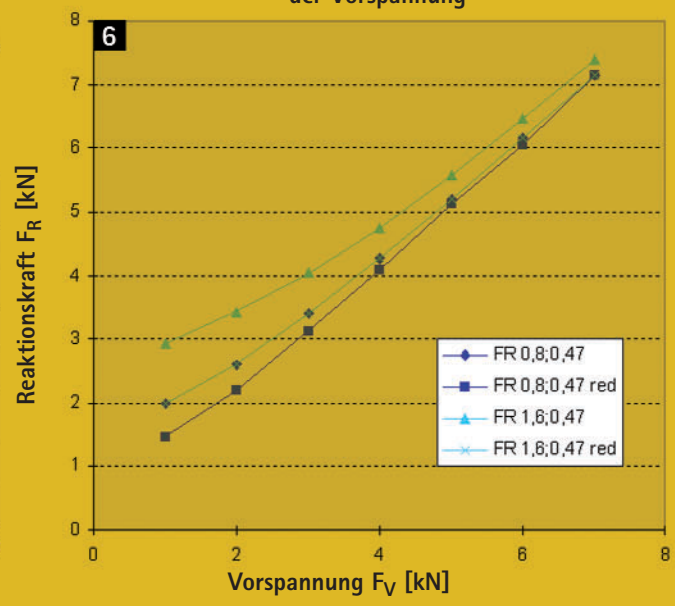
h/l über Vorspannung F_V



Reaktionskraft F_R über Vorspannung F_V berechnet und gemessen



Reaktionskräfte in Abhängigkeit von der Vorspannung



2 und 3 Die Kurven geben den berechneten Durchhang/Seilbrückenlänge (h/l) einer Seilbrücke (Abbildung 2) bzw. die berechneten Reaktionskräfte einer belasteten Seilbrücke (Abbildung 3) bezogen auf die Vorspannung des Brückenseils (11 mm Seil) wieder. Die dunklen Kurven entsprechen einer Belastung mit einer Person, die hellen einer Belastung mit zwei Personen. In der Legende bedeutet die erste Zahl die entsprechende Last F_L, die zweite den Dehnungskoeffizienten des Seiles c_S. So bedeutet zum Beispiel h/l 0,8;0,40, dass es sich hier um die Kurve für eine Belastung F_L von 0,8 kN (eine Person) und einem Seil mit einem Dehnungskoeffizienten von 0,40 kN/% handelt. c_S = 0,40...0,47 kN/% entsprechen Statikseilen, c_S = 0,20...0,24 kN/% entsprechen Kletterseilen
4 Abgebildet sind die berechneten Werte für eine Seilbrücke (11 mm Statikseil) mit einer Belastung von einer (F_R 0,8;0,47) und zwei Personen (F_R 1,6;0,47), sowie gemessene Werte aus unterschiedlichen Messungen und Untersuchungen.
5 Abgebildet sind die berechneten Durchhänge für eine Seilbrücke in redundantem und nicht redundantem Aufbau (11 mm Statikseil) mit einer Belastung von einer (h/l 0,8;0,47 bzw. h/l 0,8;0,47 red) und zwei Personen (h/l 1,6;0,47 bzw. h/l 1,6;0,47 red).
6 Abgebildet sind die berechneten Reaktionskräfte für eine Seilbrücke in redundantem und nicht redundantem Aufbau (11 mm Statikseil) mit einer Belastung von einer (F_R 0,8;0,47 bzw. F_R 0,8;0,47 red) und zwei Personen (F_R 1,6;0,47 bzw. F_R 1,6;0,47 red).

den Durchhangwinkeln und damit ansteigenden Reaktionskräften. Belastet man eine Seilbrücke in redundantem Aufbau mit einer Person, so reduziert sich der Durchhang im Vergleich zum einfachen Trageseil bei einer geringen Vorspannungen von ca. 1 kN um ungefähr 30 %, bei großen Vorspannungen von ca. 7 kN um ungefähr 50 %. Eine ähnliche Größenordnung stellt sich bei der Belastung mit zwei Personen ein, allerdings naturgemäß bei größeren absoluten Durchhängen. Im Hinblick auf den Durchhang bringt damit ein redundanter Aufbau eine deutliche Verbesserung.

Ganz anders verhält sich das bei den auftretenden Reaktionskräften in den Tragseilen. Wie aus Abbildung 6 ersichtlich, verringern sich die Reaktionskräfte bei redundantem Aufbau vor allem bei größeren Vorspannungen in den nun zwei Tragseilen nicht maßgeblich. Ist bei geringen Vorspannungen von ca. 1 kN noch eine Verringerung von ca. 25 % festzustellen (aber hier sind aus Sicherheitsgesichtspunkten die Kräfte noch vollkommen unkritisch), so bringt ein redundanter Aufbau bei Vorspannungen ab ca. 3 kN praktisch keine nennenswerte Reduktion der Reaktionskräfte (wohlgemerkt in beiden Seilen), da diese bei steigenden Vorspannungen auch bei einfachem Tragseil schon in der Größenordnung der Vorspannung liegen.

Fazit: Redundanter Aufbau reduziert den Durchhang spürbar, verringert allerdings die Reaktionskräfte (jetzt allerdings in beiden Seilen!) im Vergleich zu einem Aufbau mit einem Tragseil nur unwesentlich.

Vorspannungen

Für den Praktiker sind die oben vorgestellten Ergebnisse nur dann interessant, wenn er in irgendeiner Weise abschätzen kann, welche Vorspannungen er beim Aufbau des Systems erzielt hat. Die Erfahrung und viele Messungen zeigen, dass häufig die erreichten Spannungen während des Spannvorgangs beim Fixieren des Seiles wieder verloren gehen. Vor allem dann, wenn zum Fixieren eine HMS mit Schleifknoten oder ähnliches verwendet wird. Durch das Legen einer HMS mit Schleifknoten lagen die Vorspannungen in unseren Messungen immer deutlich unter 1 kN, egal wie stark das Seil vor dem Fixieren angespannt war. Durch den Einsatz eines Grigri als Seilfixierung können aber ohne weiteres höhere Vorspannungen erreicht werden. Letztlich hängen die erreichbaren Kräfte natürlich in erster Linie von den Personen ab, die am Seil ziehen. Ein schrankbreiter kanadischer Holzfäller wird das Seil stärker spannen, als eine zierliche Balletttänzerin. Loser Sand oder feines Geröll als Untergrund machen das Spannen schwieriger als fester Boden. Es können auch selbst konstruierte Flaschenzüge eingesetzt werden, mit denen man u. U. größere Spannkräfte erreichen kann. Alles in allem lassen sich also nur ungefähre Angaben zu erreichbaren Vorspannungen machen. Bei guten Bedingungen und kräftigen Personen darf man grob geschätzt durchschnittlich von ca. 1 kN (0,5-1,5 kN) Vorspannung pro Person ausgehen. Sind die Seile gespannt, reduziert sich die Vorspannung mit der Zeit etwas. Nach der Belastung ziehen sich die Seile wieder zusammen. Auch die Knoten ziehen sich, vor allem bei einer zusätzlichen Belastung der gespannten Seile, fester zu und der entstehende Seilauslauf aus den Knoten lässt die Vorspannung weiter sinken. Bei einem HMS mit Schleifknoten konnten wir bei einer Kraft von knapp 5 kN ca. 25 cm Seilauslauf nur aus dem Knoten in belasteter Situation messen.

Welch deutliche Auswirkungen eine solche Verlängerung, auch Setzen genannt, durch das Zusammenziehen eines Knoten und das Längen des Seiles hat, sei an einem Beispiel gezeigt. Gehen wir von einer gut vorgespannten Seilbrücke mit einer waagerechten Spannweite von 15 m (l1) aus, die, mit einer Person in der Mitte belastet, ungefähr einen Durchhang von 1 m aufweist. Das durch die Belastung weiter gedehnte Seil weist dann eine Länge von nur ca. 15,13 m (l2) auf. Kommt es darüber hinaus noch zu einem Seilauslauf aus einem Knoten und einer weiteren Dehnung des Seiles durch Setzen von ca. 25 cm, so wird sich ein Durchhang von ca. 1,6 m einstellen. Dies hat eine deutliche Verringerung der Reaktionskräfte zur Folge.
Beides, das Setzen des Seiles und der Knoten, führt im praktischen Einsatz dazu, dass die Vorspannungen einer Seilbrücke nach deren Belastung in der Regel deutlich niedriger sind als vor der Belastung. Häufig muss eine Seilbrücke sogar nachgespannt werden. Mit Blick auf die oben vorgestellten Ergebnisse zu Durchhang und Reaktionskräften werden sich praktisch häufig größere Durchhänge und damit geringere Reaktionskräfte ergeben. Für eine Sicherheitsbetrachtung an Seilbrücken würde ich aber diesen "Bonus" unberücksichtigt lassen und von den oben gezeigten Werten für die zu erwartenden Reaktionskräfte ausgehen.

Vorschau: Im Teil 2 beschäftigt sich Klaus Kunigham ausführlich damit, was gebrauchte Seilmaterialien realistisch noch an Belastung aufnehmen können. Aus den unter verschiedenen Bedingungen auftretenden Kräften und den Reißkraft-Werten gebrauchter Seile lassen sich dann Aussagen zu Sicherheitsreserven machen. Dies führt zu entsprechenden Faustregeln, die sich für den Aufbau von Seilbrücken aufstellen lassen.

Dank: Ein besonderer Dank gilt allen Helfern bei den Messungen und der Firma Edelrid, die einen Teil der Untersuchungen großzügig mit Material und Labormessungen unterstützt hat.
Weitergehende Informationen zu den Untersuchungen beim Verfasser: info@kunigham.de

■