spannende seile (3)

Festigkeitsreduzierung durch Knoten von Klaus Kunigham

Im ersten Teil der "spannenden Seile" ging es um die Belastungen, die auf eine Seilbrücke einwirken können, im zweiten um den Einfluss verschiedener Faktoren wie Alterung, UV-Strahlung, Temperatur oder mechanische Einflüsse. Im vorliegenden dritten und letzten Teil beschäftigt sich Klaus Kunigham mit der interessanten und häufig diskutierten Fragestellung der Festigkeitsreduzierung durch Knoten, insbesondere in Verbindung mit der schwächenden Wirkung der Seilalterung. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf den Konsequenzen und Forderungen beim praktischen Einsatz von Seilbrücken.

Dipl. Ing. / Dipl. Sportlehrer Klaus Kunigham, 41, studierte Maschinenbau, Physik und Sportwissenschaft und arbeitet als Berater und Trainer vorwiegend für Führungskräfte und Teams.

Festigkeitsreduzierung durch Knoten

Die für neue Seile und Bänder angegebenen Werte der Höchstzugkraft werden in ungeknotetem Zustand ermittelt. Die Knoten-Höchstzugkraft von Seilen und Bändern liegt bekanntermaßen unterhalb der Höchstzugkraft auf gerader Seilstrecke. Knoten reduzieren wie alle anderen Umlenkungen, Einschnürungen oder Verdrillungen die Festigkeit von Seilen durch die zusätzlichen Biege- und Scherbelastungen. Da die Materialien im Bergsport in der Regel geknotet oder gebunden zum Einsatz kommen, muss diese Reduktion bei der Beurteilung der Sicherheitsreserven beachtet werden.
Aus Tabelle 3 wird deutlich, dass es sich bei der Reduktion der Höchstzugkraft durch Knoten um durchaus beachtenswerte Größenordnungen handelt. Grob gesprochen kann man von einer Reduktion von ca. 20-50 % bei Seilen und von ca. 50 % bei Bändern sprechen. Bei einem linearen Zusammenhang zwischen der Festigkeitsreduktion durch Alterung und Knotung wird ein gealtertes Seil, das noch 50 % Höchstzugkraft im Vergleich zum Neuwert aufweist, in geknotetem Zustand (-40 %) noch 60 % von den noch vorhandenen 50 % aushalten. Also 0,5 x 0,6 = 0,3, damit 30 % Höchstzugkraft vom Neuwert. Ein gewaltiger Einbruch der Sicherheitsreserven!

Fazit
- Bänder reagieren sensibler auf Knoten als Seile und statische Seile sensibler als dynamische Seile.
- Ein geknotetes Band hält ca. noch die Hälfte der aktuellen Höchstzugkraft, eher weniger.
- Ein geknotetes Seil büßt ca. 20-50 % seiner aktuellen Höchstzugkraft ein.

Alterung und Schädigung von Band- und Seilmaterial

Letztlich altern Seile - wie im Teil 2 gezeigt - vor allem durch Verschmutzung und die mechanische Belastung beim Gebrauch. Alle anderen Faktoren des Belastungskollektivs können als untergeordnet angesehen werden. Allerdings mit folgenden Ausnahmen:
- Werden Seile chemisch (starke Säuren wie Schwefelsäure der Autobatterie) oder
- durch Schnitte oder andere mechanische Belastungen stark geschädigt, sind sie für den weiteren Gebrauch vollkommen ungeeignet!

In unserem Kontext würde ich in diesen Fällen nicht mehr von Alterung, sondern von Schädigung sprechen. Dabei sind gravierende Seilverletzungen in Form von Schnitten oder Aufschmelzungen bei einer visuellen und manuellen Materialkontrolle in der Regel schnell und leicht zu erkennen und führen zur sofortigen Ausmusterung des entsprechenden Materials. Anders sieht es bei Schädigungen mit Säuren aus. Mehr als einmal schon wurde eine solche Totalbeschädigung bei Seilen durch die Wirkung von Schwefelsäure (aus dem Akku eines Autos) übersehen! Tödliche Unfälle waren die Folgen. Jeglichem direkten oder indirekten Kontakt zwischen Seil- bzw. Bandmaterial aus Polyamid und starken Säuren ist vorzubeugen!

Forderung
- Band- und Seilmaterial muss vor dem Einsatz auf starke mechanische Schädigung hin kontrolliert werden.
- Seile und Bänder dürfen nie mit starken Säuren oder auch den Dämpfen der Säuren in Berührung kommen. Jeder Verdacht einer Berührung muss zur Aussonderung des Materials führen.

Gesamte Festigkeitsreduzierung bei Statikseilen

Wie schon im zweiten Teil ausführlich dargestellt, kann man davon ausgehen, dass stark gealterte Statikseile ca. ein Drittel ihrer Höchstzugkraft im Neuzustand einbüßen. Versuchsseile, an welchen 360 Mal abgeseilt wurde, wiesen dabei einen optischen Zustand auf, der jeden verantwortungsbewussten Seilnutzer zur Ausmusterung der Seile veranlasst hätte. Wie schon angemerkt, ist dabei zusätzlich zu bedenken, dass unsere Versuchsseile weder Nässe noch Schmutz ausgesetzt waren. Beides sind Faktoren, die eine Alterung beschleunigen. Versuche mit ausgemusterten Statikseilen verschiedener Outdoor-Veranstalter zeigten, dass die Reduktion der Höchstzugkraft auch knapp die Hälfte des Neuwertes erreichen kann. Darüber hinaus ist zu beachten, dass dünnere Seile (8-9 mm) schneller altern als dickere Seile (10,5-11 mm).

Wie bei der Festigkeitsreduzierung durch Knoten dargestellt (Tabelle 3), vermindert sich die Höchstzugkraft eines geknoteten Seiles weiter durch die Überlagerungen von Zugspannung und Scher- bzw. Biegespannungen im belasteten Seil. Die Reduzierung weist Werte zwischen ca. 30 % bis 50 % auf. Bei einem linearen Zusammenhang zwischen den Reduzierungen aus Alterung und Knotung ergibt sich dann für ein neues Statikseil eine Gesamtreduzierung von 0 % Alterung + 40 % Knotung = 40 % Reduktion. Im schlechtesten Fall für ein stark gealtertes Seil, 50 % Alterung + 50 % Knotung aus verbleibenden 50 % = ca. 75 %. Die schlechtesten von uns gemessenen, ausgemusterten Statikseile zeigten in der Tat in geknotetem Zustand eine Reduzierung der HZK von ca. 70 %, was die oben abgeleiteten Annahmen bestätigt (Abbildung 1). Betrachtet man die Gesamtreduzierungen in Verbindung mit den absoluten Angaben der Seilhersteller für die Höchstzugkraft der angebotenen Statikseile im Neuzustand, so ergibt sich das in Tabelle 1 dargestellte Bild.

Seildurchmesser	angegebene HZK [kN]	-40 % best case [kN]	-66 % Ende Gebrauch [kN]	-75 % worst case [kN]
11 mm	max 34	20,4		
			11,2	8,5
	min 28	16,8		
			9,2	7,0
10 mm	max 29	17,4		
			9,6	7,3
	min 22	13,2		
			7,3	5,5
9 mm	max 24	14,4		
			7,9	6,0
	min 18	10,8		
			5,9	4,5

Tabelle 1.
Absolute Werte der Höchstzugkräfte und deren Reduzierung durch Alterung und Knoten.

	F_{vor} [kN]	Last ruhend [kg]	Durchhang zu Seilbrückenlänge h/l [-]	prozentualer Durchhang [%]	Durchhangwinkel [°]
ein Tragseil 11 mm	6	80	0,03	3	3,5
	5,5	160	0,07	7	8,0
zwei Tragseile 11 mm	6	80	0,02	2	2,3
	5,5	160	0,03	3	3,5

Tabelle 2.
Dargestellt sind für eine maximale Seilbelastung von 6 kN die entsprechenden maximalen Vorspannungen und minimalen Durchhänge für unterschiedliche Lastfälle in einfachem und redundantem Aufbau.

	Band[1]			dynamisches Seil[2]			Statikseil[3]		
	daN	Rest %	R_{Knoten}%	daN	Rest %	R_{Knoten}%	daN	Rest %	R_{Knoten}%
Höchstzugkraft (ohne Knoten)	1911,8	-	-	2292,3	-	-	3509,9	-	-
Spierenstich	916,3	47,9	-52,1	1474,0	64,3	-35,7	2041,3	58,2	-41,8
Sackstich	923,7	48,3	-51,7	1537,3	67,1	-32,9	2077,6	59,2	-40,8
Bulinknoten	920,2	48,1	-51,9	1860,5	81,2	-18,8	2240,7	63,8	-36,2
Achterknoten	1201,2	62,8	-37,2	1777,3	77,5	-22,5	2273,1	64,8	-35,2
Edelridknoten	1576,1	82,4	-17,6	1948,7	85,0	-15,0	2703,2	77,0	-23,0
Seilverlängerung dopp. Spierenstich				1763,1	76,9	-23,1	2415,3	68,8	-31,2
Bandverlängerung Sackstich	554,8	29,0	-71,0						
Bandverlängerung dopp. Spierenstich	852,2	44,6	-55,4						
Bandverlängerung Achterknoten	646,6	33,8	-66,2						
Bandverlängerung Edelridknoten	623,7	32,6	-67,4						
HMS + Schleifknoten							1807,0	51,5	-48,5

Tabelle 3. Ergebnisse der Untersuchungen zur Reduktion der Höchstzugkräfte durch Knotung
[1] **Band** A-5691 Schlauchband 25 * 2,5 mm X - Tube; Bruchfestigkeit laut Katalog 1800 daN
[2] **dynamisches Seil** 10,5 mm Runout; Bruchfestigkeit laut Katalog?
[3] **Statikseil** 11 mm Superstatik weiß; Bruchfestigkeit laut Katalog 3470 daN
Rest % ist die prozentual verbleibende Festigkeit im Vergleich zur Höchstzugkraft
R_{Knoten}% ist die prozentuale Reduktion der Höchstzugkraft durch Knotung

Praxis
Sucht man einen pragmatischen Ansatz für einen Übertrag in die Praxis und schenkt den Beobachtungen und Bemerkungen aus den Belastungsmessungen an gespannten Seilen Beachtung, so ist festzustellen, dass die maximalen Kräfte an einem gespannten Seil 6 kN nicht übersteigen sollten. In der praktischen Anwendung waren bei Belastungen über 6 kN zB die Knoten nicht mehr zu lösen, Bandschlingen knirschten unter der Last und die enorme Beanspruchung des Materials war förmlich zu spüren. Geht man von diesen maximal 6 kN aus und fordert zusätzlich eine Mindestsicherheit von ca. 2 kN im normalen Gebrauchsbereich der Seile gegen statischen Seilriss, so dürfen beim Bau von Seilbrücken nur Statikseile zum Einsatz kommen, deren Höchstzugkraft im Neuzustand 30 kN übersteigt.
Betrachtet man die Tabelle 1, so dürfen stark gealterte Statikseile für den Einsatz im Grenzbereich mit großen Belastungen ausschließlich mit einem Durchmesser von 11 mm und einer guten Produktqualität im Neuzustand verwendet werden. Neben der rein physikalisch-technischen Betrachtung empfiehlt sich der Einsatz von 11-mm-Seilen auch wegen des besseren Handlings.

Forderung
Für den Aufbau von Seilbrücken sollten ausschließlich Statikseile mit einer HZK von mindestens 30 kN im Neuzustand eingesetzt werden. D.h., die Seile müssen mindestens 10 mm, besser 11 mm Durchmesser aufweisen. Die maximale Belastung gespannter Statikseile sollte 6 kN nicht übersteigen.

Praktische Grenzwerte für den Bau von Seilbrücken

Ist man als Praktiker in der Erlebnispädagogik oder auf Outdoor-Trainings tätig, so wird man nur in den seltensten Fällen beim Aufbau einer Seilbrücke in der Lage sein, die anstehenden Seilkräfte vor Ort explizit durch Messungen zu bestimmen. Durch die vorgestellten Untersuchungen und Überlegungen lassen sich aber mit der Vorgabe von maximal 6 kN Seilbelastung entsprechende pragmatische Grenzen ableiten und formulieren.

Minimale Durchhänge und maximale Vorspannungen
Betrachtet man die Reaktionskräfte in Abhängigkeit von Last und Vorspannung, die in Teil 1 (bergundsteigen 3/05) vorgestellt wurden und setzt für die Reaktionskräfte eine Obergrenze von 6 kN an, so lassen sich für unterschiedliche Lastzustände (ruhend) die entsprechenden maximalen Vorspannungen ablesen. Über diese maximalen Vorspannungen ergeben sich dann entsprechend minimale Durchhänge (Tabelle 2). Betrachtet man die in Tabelle 2 aufgeführten minimalen Durchhänge mit den Augen aus der Praxis, so wird man schnell feststellen, dass sich derart geringe Durchhänge praktisch selten erzielen lassen. Die Durchhänge sind in der Regel deutlich größer und damit die auftretenden Reaktionskräfte deutlich geringer.

Forderung
Der Durchhang einer Seilbrücke darf in redundantem Aufbau mit zwei 11-mm-Statikseilen bei einer Last von 80 kg (160 kg) bezogen auf die Länge der Seilbrücke 3 % (6 %) auf keinen Fall unterschreiten! Wegen sinnvoller Sicherheitsreserven für den praktischen Einsatz gilt als Faustformel: bei einer Person minimal 5 % Durchhang, bei zwei Personen minimal 10 %!

Entsprechend der Ausführungen im ersten Teil des Artikels ergibt sich bei einer maximal zulässigen Spannung der Brückenseile von ca. 6 kN, dass bei optimalem Spannen eines Seiles ohne jegliche Entlastung beim Fixieren maximal sechs Personen beteiligt werden dürfen. Für die Praxis heißt das, dass Tragseile für Seilbrücken mit maximal fünf bis sechs Durchschnittspersonen gespannt werden dürfen. Auch unter Zuhilfenahme eines Bauernflaschenzuges. Vorsicht ist beim Einsatz aller selbstgebauten Flaschenzüge geboten. Da beim Spannen auf die Flasche deutlich größere Kräfte als auf das Tragseil wirken, dürfen auf keinen Fall Reepschnüre beim Aufbau von Flaschenzügen verwendet werden. Sie können durch die auftretenden Kräfte beim Spannen mit mehreren Personen oder bei der Belastung der Seilbrücke reißen! Es dürfen nur entsprechend dimensionierte Bandschlingen zum Einsatz kommen. Vorsicht ist auch geboten bei allen Arten von gezahnten oder scherenden Rücklaufsperren wie Steigklemmen oder der Gardaklemme. Die scharfen Zähne können bei den auftretenden Kräften die Seilmäntel aufreißen. Auch wenn uns von einigen Anwendern Rückmeldungen vorliegen, dass bis jetzt keine Probleme mit gezahnten Rücklaufsperren aufgetreten seien, so gibt es doch auch Beispiele, bei denen Mantelrisse aufgetreten sind. Bei scherenden Rücklaufsperren kann es im ungünstigsten Fall bei den angegebenen Grenzwerten zu Seilrissen kommen. Im Gegensatz dazu kann der Grigri, auch wenn es nicht explizit für diesen Einsatz konstruiert wurde, als Rücklaufsperre nach unseren Erfahrungen empfohlen werden. Versuche im Labor haben gezeigt, dass der Grigri sogar als Kraftbegrenzer in einem gespannten System funktioniert. Bei neuen Seilen lag die Durchzugskraft bei langsamen Lastaufbau ca. 4 kN, bei gebrauchten Seilen bei ca. 7 kN.

Forderung
- Tragseile (11-mm-Statikseil) von Seilbrücken dürfen mit max. 5 Personen gespannt werden.
- Reepschnüre dürfen nicht eingesetzt werden.
- Gezahnte und scherende Rücklaufsperren sollten nicht eingesetzt werden, zumindest ist Vorsicht angebracht. Ein Grigri eignet sich als Rücklaufsperre und wirkt als Kraftbegrenzer.

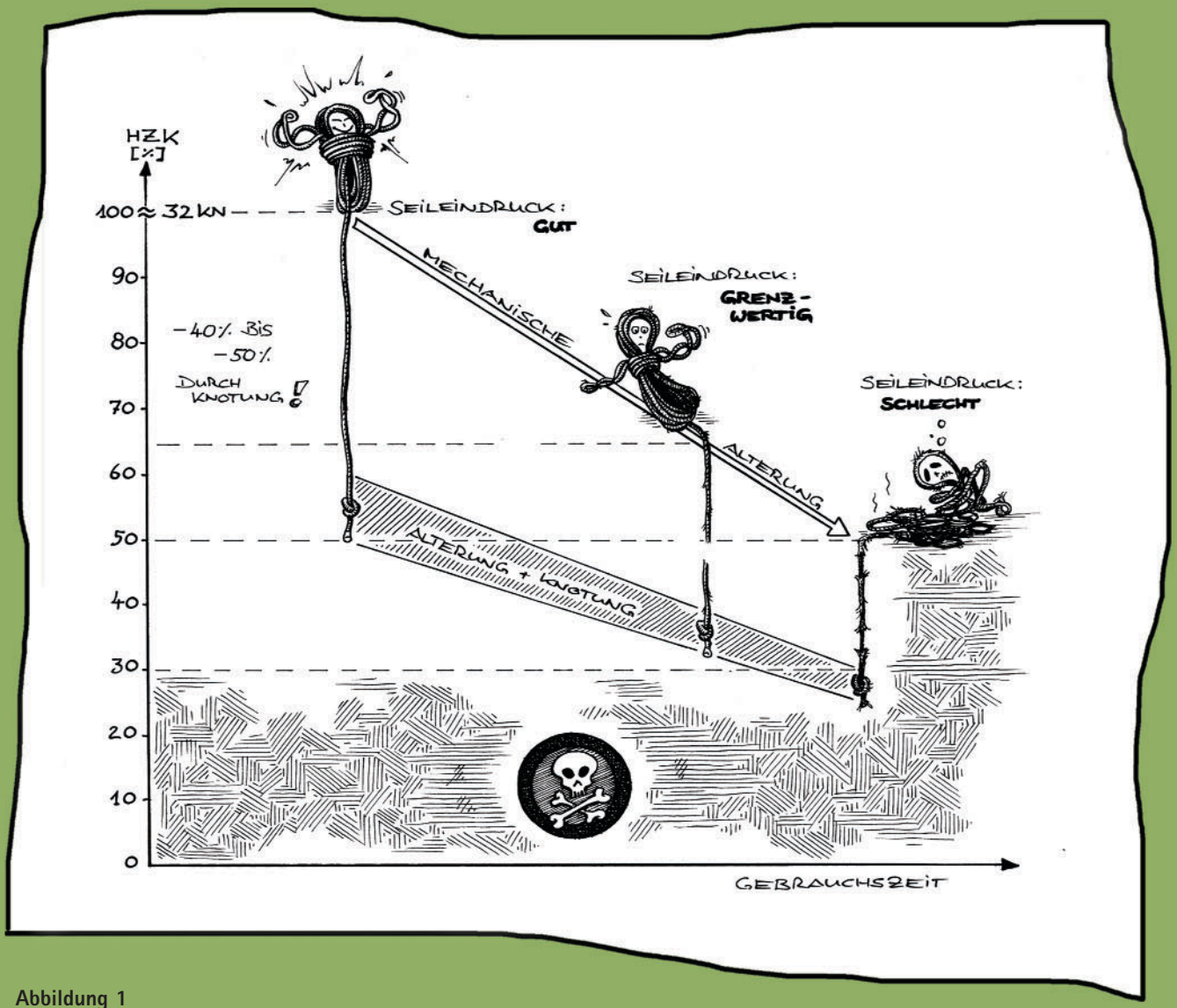
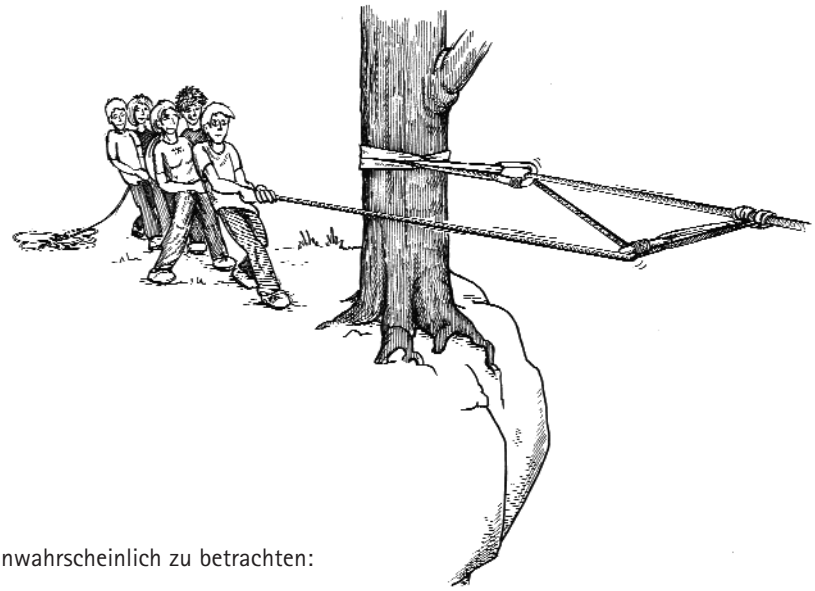


Abbildung 1
Übertrag der Festigkeitsreduzierung von gebrauchten zu gebrauchten und geknoteten Statikseilen.
Durch Alterung kommt es zu einer Reduzierung von ca. 33 % bis 50 %. Durch Knotung kommt es zu einer weiteren Reduzierung von ca. 40 % bis 50 % auf der Basis der bereits gealterten Seile. Zu erwarten ist eine Gesamtreduktion bei geknoteten und gealterten Seilen von ca. 40 % bis 75 %.

Illustrationen: ERBSE



Beurteilung der Gefahr von Seilrissen bei Seilbrücken

Beachtet man die Spalte "Empfohlen", ist ein Seilriss als unwahrscheinlich zu betrachten:

Empfohlen	Nicht empfohlen
Redundanter Aufbau einer Seilbrücke mit 11-mm-Statikseilen	Aufbauten mit einem Seil
	Verwendung von Kletterseilen
	Seildurchmesser kleiner 10,5 mm
Kein Kanteneinfluss auf die Tragseile	Tragseile liegen auf Kanten auf
Seile ohne Schäden und ohne Verdacht auf Schäden verwenden	Seile mit Schäden oder Verdacht auf Schäden
Spannen der Seile mit max. 5 Durchschnittspersonen	Spannen mit mehr als 5 Durchschnittspersonen
Rücklaufsperre: Grigri oder Wickelmethode. Der Grigri wirkt sogar als Kraftbegrenzer	Einsatz von gezahnten oder scherenden Rücklaufsperren
Beim Aufbau von Flaschenzügen entsprechend dimensionierte Bandschlingen verwenden	Reepschnüre beim Aufbau von Flaschenzügen
Belastung kleiner 80 kg (160 kg) quasiruhend und Durchhang größer 5 % (10 %)	Belastung größer 80 kg (160 kg) quasiruhend und Durchhang kleiner 5 % (10 %)
Anschlagmittel und Anschlagpunkte (Fixpunkte) mit ausreichender Festigkeit	Unsichere Anschlagmittel und Anschlagpunkte
Seilfixierungen mindestens auf einer Seite unter Last lösbar	Seilfixierungen unter Last nicht lösbar

Dank
Wie immer gilt ein besonderer Dank 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 über den Verfasser: info@kunigham.de