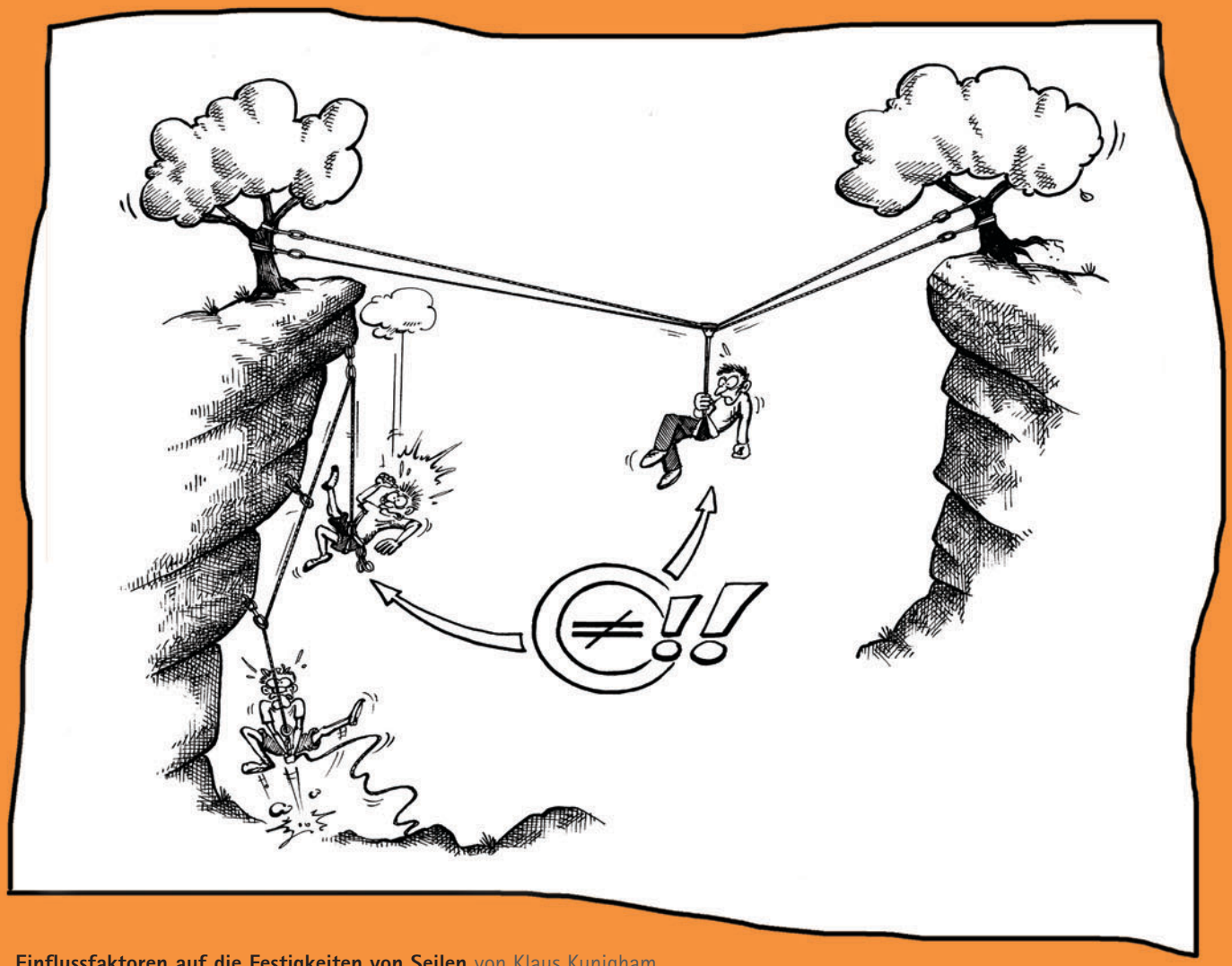
spannende seile (2)



Einflussfaktoren auf die Festigkeiten von Seilen von Klaus Kunigham

Im ersten Teil des Artikels waren die zu erwartenden Durchhänge und Reaktionskräfte bei 11-mm-Seilen in einfachem und redundantem Aufbau Gegenstand der Untersuchung. Auch Aussagen zu erreichbaren Vorspannungen mit unterschiedlichen Methoden wurden vorgestellt. Es ging um die auftretenden Belastungen, die auf eine Seilbrücke einwirken können. Um Antworten auf Fragen nach den Sicherheitsreserven bei Seilbrücken zu finden, müssen die auftretenden Belastungen mit den real vorhandenen Festigkeiten ins Verhältnis gesetzt werden. Im zweiten und dritten Teil liegt das Augenmerk auf den praktischen Festigkeiten gebrauchter Materialien und dem Einfluss verschiedener Faktoren wie Alterung, UV-Strahlung, Temperatur oder mechanische Belastungen.

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

Sicherheitsreserven

Wollen wir Aussagen über die Sicherheitsreserven bei vorgespannten Seilaufbauten machen, so sind die zu erwartenden Belastungen ein wichtiger Punkt. Was aber hält das eingesetzte Material eigentlich aus? Dazu gibt es aus dem Klettersport einige Untersuchungen. Von Pit Schubert stammt die Aussage: "... normgeprüfte Bergseile können weder im Anseilknoten noch an Karabinern, Umlenkungen oder in den Sicherungsgeräten reißen...". Bekannt sind die Ausnahmen bei Vorschädigungen des Seiles z.B. durch Schwefelsäure oder einer Scharfkantenbelastung. Können die Belastungen eines Seiles bei einem Sturz mit den quasistatischen Belastungen bei einer Seilbrücke jedoch ohne weiteres verglichen werden?
In der Tat handelt es sich dabei um zwei zu unterscheidende Phänomene. Bei einem Sturz muss das Seil in erster Linie die Sturzenergie aufnehmen können und natürlich auch den in diesem Zusammenhang auftretenden Kräften widerstehen. Im Falle einer annähernd statisch belasteten Seilbrücke dagegen muss ein Seil im Wesentlichen die statischen Kräfte aushalten. Bei einem neuen Statikseil lässt sich zwar die statische Höchstzugkraft (HZK) den Herstellerangaben entnehmen (Bei Kletterseilen wird dieser Wert selten in Katalogen ausgewiesen). Aber zwischen einem neuen Seil und einem, das seit einigen Jahren intensiv z.B. in der Erlebnispädagogik eingesetzt wurde, liegen mit hoher Wahrscheinlichkeit Welten. Was genau sind diese Welten?

Wie viel gebrauchte Materialien noch aushalten, lässt sich in aller Regel schwer beurteilen, es sei denn, die Gegenstände werden in einer zerstörenden Werkstoffprüfung getestet. Eines ist aber sicher: Die Festigkeitseigenschaften werden durch den Gebrauch der Materialien verringert. Während des Einsatzes sind die Produkte in der Regel mechanischen, thermischen und chemischen Beanspruchungen ausgesetzt. Diese wirken letztlich als Beanspruchungskollektiv auf die Materialien ein und verändern diese im Sinne ihrer angedachten Funktion negativ.
Als maßgebliche Beanspruchungen sind zu nennen:

mechanisch

- Walken, Biegen und Knicken des Seils durch Sichern, Abseilen, Ablassen in den unterschiedlichen Geräten und durch die Umlenkung in Karabinern oder Kanten.
- Reiben durch Sichern, Abseilen, Ablassen usw.
- Reiben an Karabinern, Kanten oder anderen Materialien
- Reiben an kleinsten Schmutz- und Felspartikeln, die durch den Gebrauch in das Seil gelangt sind und die Filamente (Seilfasern) beschädigen
- Reiben der Filamente aneinander
- Feuchtigkeit
- Belastung durch scharfe oder spitze Gegenstände
- Quetschen, Scheren und Kerben durch Knoten und Kanten

thermisch

- Transport in sonnenbestrahltem PKW bis ca. 70° C
- Beim Abseilen und Sichern durch Reibungswärme in Geräten
- Seil-auf-Seil-Reibung
- UV-Bestrahlung der Sonne
- Kälte

chemisch

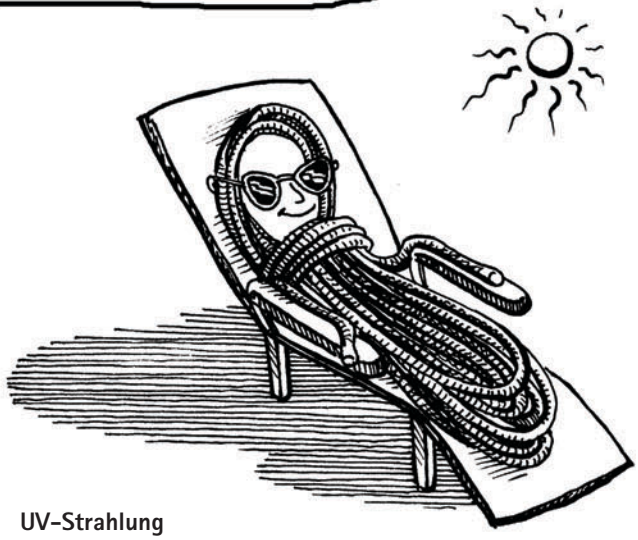
- chemisch-physikalische Umbauprozesse des Materials (natürliche Alterung)
- Markierungsfarben
- Klebstoffe z.B. von Markierungskleber
- Säuren (z.B. Batteriesäure im Auto, Garage, Keller...)
- andere Arten von chemischen Stoffen, fest, flüssig oder dampfförmig

Natürliche Alterung

Die in der Regel aus Polyamid hergestellten Seil- und Bandprodukte altern natürlich. Umwandlungen im makromolekularen Bereich führen daher auch bei nicht benutzten Seilen zu veränderten physisch-mechanischen Eigenschaften. Vogel berichtet von einer leichten Abnahme der bruchfrei ertragenen Normstürze, die bei einer maximal untersuchten Lagerungszeit von 200 Monaten (knapp 17 Jahre!) ca. -20 % betrug. Das Material wurde im Institut für Fördertechnik in Stuttgart, dunkel, trocken, kühl und ohne Kontakt zu aggressiven Medien gelagert. Beachtet man zusätzlich, dass die Seile vor 20 oder 30 Jahren im Verhältnis schon von vornherein weniger bruchfreie Normstürze ertragen haben sowie eine geringere Reißfestigkeit aufwiesen, so bedeutet das praktisch, dass man Seile, die seit 20 bis 30

Jahren im Keller liegen, nicht mehr zum Einsatz für Personensicherung verwenden soll. Bei dieser Untersuchung handelt es sich wohl gemerkt um die dynamischen Eigenschaften eines Kletterseiles. Man kann aber davon ausgehen, dass es sich bei den statischen Eigenschaften von Statikseilen ähnlich verhält.

Fazit: Die meisten Hersteller empfehlen, dass Seil- und Bandmaterial nicht älter als 10 Jahre sein soll. Diese Empfehlung kann man als "vorsichtig" betrachten, solange die Seile ungebraucht, kühl, trocken, luftig und vor allem ohne Kontakt zu aggressiven Medien gelagert werden.



UV-Strahlung

Bergseile und textile Ausrüstungsgegenstände wie Bänder, Schlingen und Gurte sind aus Polyamiden hergestellt.
UV-Strahlen sind Witterungseinflüsse, die sich für Polyamide festigkeitsminimierend auswirken. Aus diesem Grund werden Polyamiderzeugnisse, die einer UV-Strahlung ausgesetzt sind, aus UV-stabilisiertem Polyamid gefertigt.
Eine Maßnahme, die den festigkeitsminimierenden Einfluss der Strahlung möglichst aufheben soll. Dies ist auch bei allen Markenprodukten von Bergsportartikeln der Fall. Da die textilen Ausrüstungen aber häufig stark durch Sonnenbestrahlung ausbleichen, stellt sich immer wieder die Frage nach dem Einfluss der UV-Strahlung auf die Festigkeit von Bergsteigerausrüstung. Es wurden schon mehrere Untersuchungen dazu durchgeführt. Alle kommen zum gleichen Ergebnis: Eine Schädigung durch natürliche UV-Strahlung im Verhältnis zur Schädigung durch den normalen Gebrauch ist vernachlässigbar gering oder nicht signifikant nachweisbar.

Fazit: UV-Strahlung hat auf textile Ausrüstungsgegenstände wie Seile, Bänder usw. im Verhältnis zur Schädigung durch normalen Gebrauch einen vernachlässigbar geringen Einfluss.

Temperatur

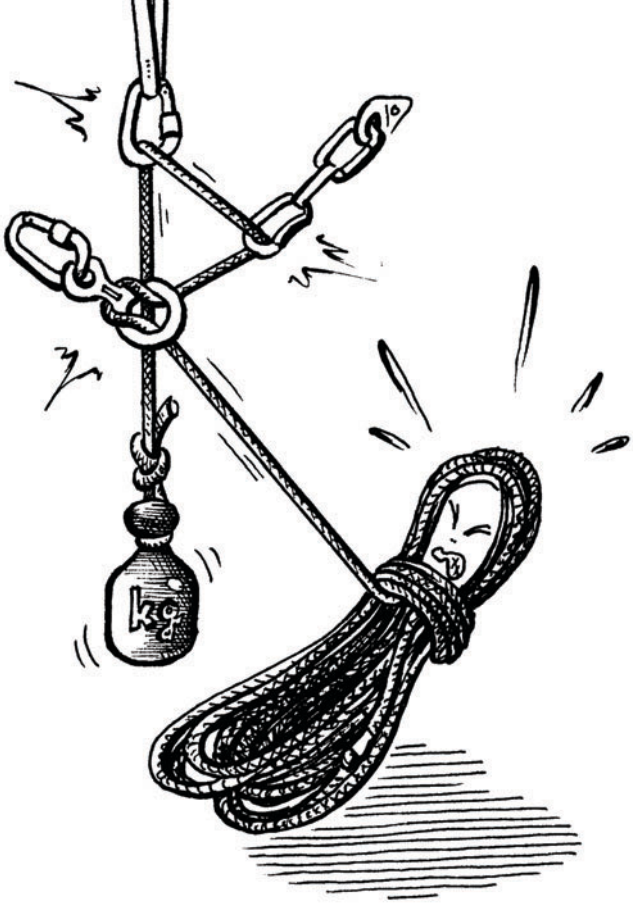
In seiner Untersuchung zu den dynamischen Gebrauchseigenschaften verschiedener Bergseile - es wurden vier verschiedene Bergseile von drei verschiedenen Herstellern untersucht - in Abhängigkeit von der Lagertemperatur fand Vogel keine signifikanten Unterschiede der dynamischen Gebrauchseigenschaften bei Seilen, die thermisch im Tageszyklus schwankend oder konstant bei einer Temperatur von 100° C gelagert wurden. Für einen weiteren Schritt der Untersuchung wurden die Seile aus diesem Grund bei konstanter Temperatur von 100° C bis zu 1000 Stunden (knapp 42 Tage!) gelagert. In Fallversuchen nach DIN EN 892 konnte kein signifikanter Einfluss der Lagerung bei der untersuchten Temperatur und Zeit auf die Anzahl bruchfrei ertragener Stürze gefunden werden. Dennoch empfiehlt es sich, Seil und Bandmaterial so zu lagern, wie es von den Herstellern empfohlen wird: kühl, trocken, luftig und vor allem ohne Kontakt zu aggressiven Medien. Auch bei dieser Untersuchung waren vor allem die dynamischen Eigenschaften der Seile im Fokus. Man kann aber auch hier davon ausgehen, dass sich die statischen Eigenschaften von Statikseilen nur unwesentlich verändern. Keinerlei Aussagen fand ich zum Festigkeitsverhalten von Seilen und Bändern bei unterschiedlichen Materialtemperaturen während der Belastung. Dies wäre besonders an den Grenzen des Einsatzbereiches von ca. -20° C bis 40° C interessant.

Fazit: Temperaturen bis zu 100° C beeinflussen Bergseile in ihren dynamischen Eigenschaften nicht. Seil- und Bandmaterialien, die in einem Sonnen beschienenen Auto liegen, in dem bis zu 70° C auftreten können, nehmen aufgrund der Temperatur keinen erkennbaren Schaden.

Feuchtigkeit

Mehrere Untersuchungen berichten von einer Verringerung der statischen Reißfestigkeit bei nassen Statikseilen von ca. 10 %. Danach ist auch die Feuchtigkeit ein Reduktionsfaktor der Gebrauchseigenschaften von Bergseilen.

Fazit: Feuchtigkeit setzt Bergseilen zu! Zum einen verändert Feuchtigkeit die Gebrauchseigenschaften, zum anderen werden Schmutzpartikel durch Feuchtigkeit leichter in das Seilinnere transportiert.

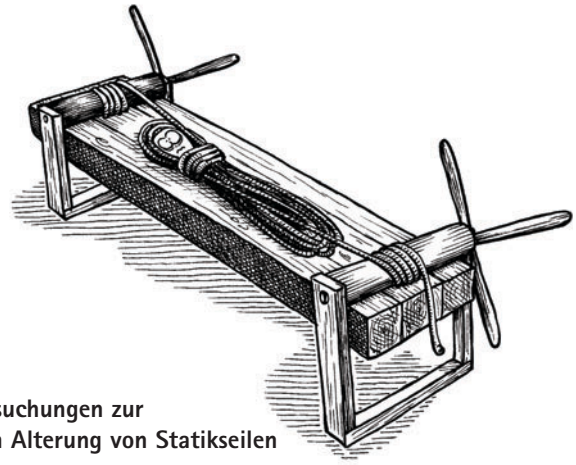


Mechanische Einflüsse durch Gebrauch

Die durch den Gebrauch der Materialien einhergehende Alterung hängt vorwiegend von mechanischen Einflüssen ab. Durch innere "Abrasion" (Abtragung von Material) in Folge von in das Seil eingedrungenen kleinen Schmutz- und Felspartikeln werden die statischen und dynamischen Eigenschaften der Seile negativ beeinflusst. Die Partikel scheuern und reiben durch die Bewegungen des Seiles und die massiven Durchwalkungen z.B. beim Abseilen oder Ablassen an den hauchdünnen Filamenten im Seilkern und verletzen diese. Oder die dünnen Seilfasern beschädigen sich gegenseitig bei den starken, oben angesprochenen mechanischen Belastungen. Wie enorm die Einbuße der Höchstzugkraft eines gebrauchten Seiles sein kann, zeigt eine unserer Vergleichsmessungen.
Verglichen wurden zwei Statikseile der Firma EDELRID (Tabelle 1). Bei beiden Seilen handelte es sich um ein 11-mm-Superstatic. Das eine neu, das andere fünf Jahre alt und intensiv gebraucht. Vor dem vergleichenden Versuch zur Ermittlung der Höchstzugkraft wurden beide Seile in einem Zugversuch eingesetzt, um die Bremskraft eines Petzl Grigri zu ermitteln.
Geht man davon aus, dass nach dem Grigri Versuch das neue Seil einem noch nicht übermäßig gebrauchten Seil entsprochen hat, dann brachte es noch 93 % Höchstzugkraft der Herstellerangabe eines neuen Seiles auf. Das fünf Jahre alte, stark gebrauchte Seil nur ca. 50 %! Eine beachtliche Verringerung der Höchstzugkraft. Solche Ergebnisse, auch wenn es sich hier um eine Einzelmessung handelt, mahnen zur Vorsicht.

Seil – 11mm Superstatic weiß	Höchstzugkraft in daN	Höchstzugkraft in % vom Katalogwert
Katalogangabe	3470	100
gebraucht	1654 / 1826	48 / 53
neu nach Grigri Versuch	3221	93

Tabelle 1: In der Tabelle werden die gemessenen Höchstzugkraftwerte eines stark gebrauchten (1996) und eines fast neuen Statikseiles (2001) dargestellt.



Eigene Untersuchungen zur mechanischen Alterung von Statikseilen

Mit dynamischen Kletterseilen wurden in der Vergangenheit eine ganze Reihe von Untersuchungen und Forschungen durchgeführt. Die Einflüsse der Alterungsfaktoren auf die Gebrauchseigenschaften und Kenndaten der Seile sind entsprechend gut dokumentiert. Für den Kontext vorgespannter Seilaufbauten mit Statikseilen konnten wir Untersuchungen über das Verhalten gealterter Seile im Bezug auf deren Höchstzugkraft, deren Dehnungsverhalten und der dynamischen Eigenschaften in der Sturzprüfung durchführen. Das gezielte Altern der Statikseile wurde durch Abseilen an 11-mm-Statikseilen im Einzelstrang, im Doppelstrang und auch an 9-mm-Seilen durchgeführt. Die maximale Alterungsbelastung am 11-mm-Einzelstrang betrug 360 Abseilzyklen. Keinen Einfluss auf die Alterung hatten bei den Versuchen Feuchtigkeit und Schmutz. Beides Faktoren, die Seile im praktischen Einsatz beim Aufbau von Seilbrücken mitunter zusätzlich belasten. Der Einfluss dieser beiden Faktoren auf die Reduktion der Seilkenndaten konnte in dieser Untersuchung also nicht bestimmt werden. Allerdings wurden einige ausgemusterte Statikseile aus dem Einsatz in der Erlebnispädagogik mit in die Untersuchung aufgenommen, um zumindest einen Anhaltspunkt darüber zu erhalten, was diese Seile noch an Kenndaten aufweisen, wenngleich deren Vorleben nicht im Einzelnen dokumentiert war.

Die Untersuchung zeigt, wie erwartet, eine Abnahme der Höchstzugkraft mit zunehmender Anzahl von Abseilvorgängen. Die aufgetragenen Messwerte beziehen sich auf Versuche mit einem 11-mm-Einzelstrang.
Die Ergebnisse liegen mit Ausnahme zweier Ausreißer auf einer durchgängigen Kurve (Bild 1). Für die Messung der Höchstzugkraft wurde jeweils nur ein Probestück aus den jeweiligen Seilen gemessen. Mehr Versuchsmaterial stand leider nicht zur Verfügung, da neben der statischen Prüfung noch zusätzlich eine dynamische Prüfung durchgeführt wurde. Eine eindeutige Erklärung für die beiden deutlichen Ausreißer liegt nicht vor. Für die weitere Argumentation mit den Ergebnissen wird aus diesem Grund eine um diese Streuung reduzierte Kurve verwendet. Diese Kurve läuft idealisiert asymptotisch auf eine Höchstzugkraft von ca. 2/3 der Höchstzugkraft im Neuzustand zu.
Weitere Messungen mit ausgemusterten Statikseilen aus der erlebnispädagogischen Arbeit zeigen Werte, die bis zur Hälfte der Höchstzugkraft im Neuzustand hinunter reichen. Ausgemusterte Seile im geknoteten Zustand (8er-Knoten) weisen wie zu erwarten noch deutlich geringere Festigkeitswerte auf. Die prozentuale Reduzierung der Höchstzugkraft gebrauchter Seile durch Knotung entspricht damit in der Größenordnung jener von Neuseilen (siehe Teil 3). Das ist für die spätere Argumentation der Festigkeitsannahmen von Bedeutung.

Höchstzugkraft nach Alterung (11mm Superstatik)

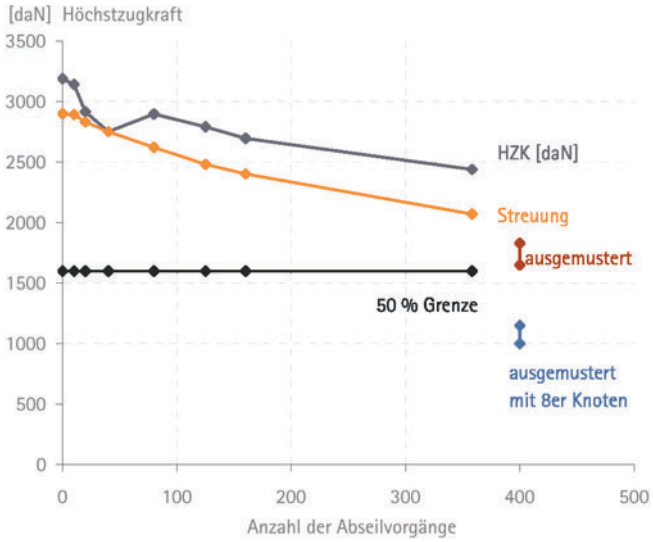


Bild 1: Im Bild dargestellt sind die Ergebnisse der Untersuchung bezüglich der Abnahme der Höchstzugkraft (HZK) über der Anzahl der Abseilvorgänge am Einzelstrang. Die ermittelten Werte liegen bis auf zwei Ausreißer auf einer durchgängigen Kurve. Zusätzlich aufgetragen sind die Messungen ausgemusterter Statikseile im freien Seilstück und in geknotetem Zustand.

Das Dehnungsverhalten der gealterten Seile wird in Bild 2 dargestellt. Mit zunehmender Anzahl der Abseilvorgänge dehnen sich die Seile bei Belastung mehr und mehr, sie werden also "weicher".

Dehnungsverhalten nach Alterung 11mm Superstatik

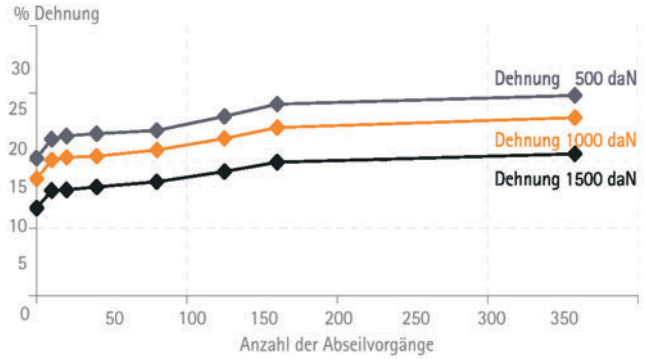


Bild 2: Dehnungsverhalten von 11-mm-Superstatik der Firma EDELRID über der Anzahl von Abseilvorgängen. Mit Zunahme der Abseilvorgänge zeigt sich auch eine Zunahme der Dehnung.

Interessant war auch die Untersuchung eines ausgemusterten, gebrauchten Statikseiles eines Anbieters von Outdoor-Trainings, 10 mm Superstatik schwarz der Firma EDELRID. Das Seil wurde in 12 Teilstücke zerschnitten und mit diesen Teilstücken wurden Untersuchungen der noch vorhandenen Höchstzugkraft sowie dynamische Untersuchungen zur Anzahl bruchfreier Normstürze von Statikseilen durchgeführt. (Der Normsturz für Statikseile unterscheidet sich wesentlich von dem für Kletterseile.)
Über die Seillänge hinweg wiesen die Seilstücke folgende Höchstzugkräfte (HZK) auf: 16,5 kN / 15,8 kN / 17,2 kN / 18,2 kN / 16,0 kN bei einer angegebenen Höchstzugkraft im Neuzustand von ca. 30 kN. Die noch verbliebene HZK im Bezug auf die HZK des neuen Seiles lag damit zwischen 53 % und 61 %.
Die dynamischen Untersuchungen der Probestücke erbrachten eine überraschend deutliche Abnahme der bruchfreien Normstürze für die gealterten Statikseile. Davon waren auch die Seilentwickler bei EDELRID nicht ausgegangen und entsprechend überrascht, da die Statikseile im Neuzustand durchwegs sehr viel mehr als die in der Norm geforderten bruchfreien Stürze aufweisen. Die Seilforschung bei EDELRID beschäftigt sich noch mit diesem Ergebnis. Allemal ein weiterer Hinweis darauf, dass Statikseile nie zum Vorstieg eingesetzt werden dürfen. Statikseile sind aufgrund ihrer Konstruktion prinzipiell nicht für Vorstieg-Situationen gebaut. Und auch im Toprope-Einsatz setzt die starke Walkarbeit in der Umlenkung Statikseilen mehr zu als dynamischen Kletterseilen.

Fazit:
1. Seile altern durch die mechanische Belastung des Gebrauchs mitunter enorm. Das Kantenarbeitsvermögen und die Anzahl bruchfrei ertragener Stürze von Kletterseilen sinken unter Umständen bis auf 10 % vom Neuwert. Häufig im Toprope genutzte Seile sollten nie mehr im Vorstieg genutzt werden.
2. Auch bei Statikseilen ist eine beträchtliche Reduktion der statischen Festigkeit durch den Gebrauch gegeben. Alte Seile weisen mitunter nur noch die Hälfte der Höchstzugkraft im Neuzustand auf!
3. Stark gealterte Statikseile weisen ebenfalls überraschend wenig bruchfreie Normstürze auf. Statikseile dürfen auf keinen Fall im Vorstieg verwendet werden!

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. Weitere Informationen über den Verfasser erhältlich: info@kunigham.de. Teil [3] der spannenden Seile beschäftigt sich schließlich mit den praktischen Grenzwerten beim Bau von Seilbrücken bzw. der Festigkeitsreduktion bei Seilen durch Knoten, Alterung und Beschädigung.

Illustrationen: ERBSE ■