

Seile und die Grenzen ihrer Performance – Teil 2

In der analyse:berg-Sommerausgabe 2025 hat sich Bernt Prause im ersten Teil seiner Serie zum Thema „Seile“ mit der historischen Entwicklung der Seiltechnologien und was das für die Praxis bedeutet beschäftigt. Nun geht er ins Detail, beschreibt Prüfverfahren und erläutert, wie gut diese die Mechanik des Seilversagens abbilden können.

Aktuell finden sich in den Beschreibungen bzw. technischen Daten bei Einfachseilen in den Katalogen und auf den Websites der Hersteller u. a. Begriffe wie „Vielseitiges High End Seil mit erhöhter Sicherheit bei Kantenbelastung – scharfkantengeprüft“ oder „Imprägniertes, dynamisches Einfachseil mit hoher Schnittfestigkeit“. Beides sind sehr starke Verkaufsargumente. Betrachtet man jedoch die einem Bergseil entsprechend der EN 892 beigefügten technischen Daten, wird man keinen normativ verankerten Wert für diese Aussagen finden. Lediglich im UIAA-Standard 101 wird aktuell ein Scharfkantentest beschrieben, bei dem ermittelt wird, wie hoch das Energieaufnahmevermögen eines Seiles (angegeben in kJ) bei einem Sturz über eine Kante mit dem Radius von 0,75 mm ist. Dieser Test ist ein freiwilliger und außerdem der einzige, der international definiert ist.

Damit stellt sich nun für die Leserin und den Leser die Frage, was eigentlich hinter diesen Begriffen steckt, worauf die Aussagen basieren, wie geprüft wird und welche Praxisrelevanz damit verbunden ist. Letztendlich aber auch welche aktuelle normative Legitimation gegeben ist, um mit diesen Beschreibungen dem Nutzer eine besondere Leistungsfähigkeit eines Seiles zu signalisieren.

Doch der Reihe nach.

Funktionelle und sicherheitstechnische Daten

Betrachtet man die technischen Daten von Seilen, lassen sich diese prinzipiell in unterschiedliche Kategorien einordnen – und zwar in funktionelle und in sicherheitstechnische Daten.

FUNKTIONELLE DATEN ENTSPRECHEND DER EN 892

- Metergewicht in g/m
- Mantelanteil in % vom Metergewicht
- Durchmesser in mm
- Mantelverschiebung in mm oder % (bezogen auf eine Prüflänge von 2 m)
- Gebrauchsdehnung in % (bei Einfach- und Zwillingsseilen mit 80 kg, bei Halbseilen mit 55 kg)
- Seillänge in m

ERGÄNZEND

- Wasseraufnahme geprüft mit dem „waterrepellent Test“, verankert in der UIAA 101¹, der die maximale Wasseraufnahme in % (im Neuzustand) angibt.

Diese Daten werden im Neuzustand eines Seiles nach einer entsprechenden Vorklimatisierungsphase ermittelt und können im weitesten Sinne als funktionelle Daten betrachtet werden, was sich in der Praxis

Bernt Prause
Dipl. Ing. (FH)
PSA-Experte

im Gesamtgewicht, Packvolumen, Geschmeidigkeit, Mantelstabilität und der Dehnbarkeit des Seiles bemerkbar macht. Durchmesser und Seillänge verändern sich über die Nutzungsdauer sukzessive – Seile verkürzen sich durch den Gebrauch! Auch Luftfeuchte und Temperatur wirken sich entsprechend aus. Die Hydrophobierung, also die Imprägnierung, wird sich mit dem Gebrauch ebenfalls abbauen, d. h. die Schmutzaufnahme nimmt zu.

All dies macht sich in den Handhabungseigenschaften eines Seiles mehr oder minder bemerkbar und wirkt sich sekundär auch auf die Sicherheitsreserven aus. So wird z. B. mit zunehmendem Abrieb der Seilmantel „schwächer“, erkennbar an der Pelzbildung, wenn die Mantelfasern abstecken, weil sie durchtrennt worden sind.

Mit zunehmender Schmutz- und Partikelaufnahme wird sich ein „innerer“ Abrieb im Seilkern einstellen und die Leistungsfähigkeit – sprich Sturzzahl und Energieumwandlungs- bzw. -aufnahmevermögen – wird sich reduzieren.

SICHERHEITSTECHNISCHE DATEN

- Sturzzahl
- Fangstoß
- Fangstoßdehnung

Die sicherheitstechnischen Daten sind mittels dynamischer Testmethoden (Sturzprüfung) ermittelte Daten im Neuzustand des Seiles (Details dazu in der analyse:berg-Winteraushgabe 2021/22, Seite 140 ff).

Häufig wird von Laien auch die Frage gestellt „Wie viel hält denn so ein Seil aus, bis es reißt?“, also wo liegt die Bruchlast bzw. Höchstzugkraft, was uns zum eigentlichen Thema bringt.

Bruchlast (Höchstzugkraft)

In der Praxis ist für Bergseile – also dynamische Seile – der Wert für die Bruchlast nur untergeordnet relevant und auch nicht in der EN 892 Bergseile bzw. UIAA 101 vorgesehen, denn die Randparameter, wie sie bei der Ermittlung der Höchstzugkraft auftreten, werden nie erreicht werden.

Die Ermittlung der Bruchlast erfolgt durch ein kontinuierliches Aufbringen von Zugkraft mit einer geringer (Abzugs-) Geschwindigkeit von ca. 200 mm pro Minute. Dabei sind die Seilenden an sogenannten Muschelspannköpfen fixiert – um jeglichen Umlenkungs-, Kanten- oder Knoteneinfluss mit Quetschen auszuschließen –, so dass das Seil in der freien Länge zum Bruch kommt. Dabei werden der Kraftverlauf und die Dehnung bis zum Bruch gemessen.

Während dieser Prüfung wird der Verlauf der Kraft [F] über den Dehnungsweg in Prozent als Kraft-Dehnungsdiagramm aufgezeichnet. Damit lässt sich prinzipiell – durch die Integration der durch die Kraft-Dehnungskurve eingeschlossenen Fläche – die Arbeit, die benötigt wird, um das Seil zu zerreißen, berechnen.

Dynamische Prüfungen

Wie bereits in Teil 1 erwähnt (analyse:berg-Sommerausgabe 2025, Seite 136 ff) ist die Sturzprüfung durch die Arbeiten von Maurice Doderro schon seit den 60er-Jahre des vorigen Jahrhunderts fester Bestandteil zuerst der UIAA-Standards

und dann der DIN 7947 bis zur heutigen EN 892.

Der große Unterschied zu einem (quasi-)statischen Test an einer Zugprüfmaschine ist vor allem der Faktor Zeit. Bei der quasistatischen Prüfung erfolgt im Vergleich zur dynamischen Prüfung der Lasteintrag mit einer sehr langsamen Abzugsgeschwindigkeit bzw. Kraft/Zeitverlauf. Beim Abfangen von Stürzen bauen sich Fangstoß, Sturzzug und die vektorielle Addition an der Prüfkante aber in sehr kurzer Zeit auf (ca. 0,1 bis 0,12 sec).

Beim langsamen Lasteintrag, wie z. B. beim Zugversuch, hat das makromolekulare Seilgefüge Zeit für Umlagerungen, bei nur 0,1 Sekunden nicht mehr. Dies zeigt sich auch in den unterschiedlichen Bruchzonen im Gefüge: Beim einen laufen die Bruchzonen durch die teilkristallinen Bereiche, beim anderen durch die amorphen Bereiche.

In Bezug auf die Abläufe beim Abfangen eines Sturzes ist eine dynamische Prüfung einfach sinnvoll.

Im Wesentlichen beschreibt die dynamische Prüfung von Bergseilen das Energieumwandlungsvermögen eines Seiles.

Gemessen werden dabei die Fangstoßkraft, die Fangstoßdehnung und – da die Prüfung wiederholend ist – die Anzahl der bruchfrei überstandenen Stürze bis zum Bruch.

Dabei ist es interessant zu sehen, wie sich unter denselben Sturzbedingungen durch die Wiederholungen das Dämpfungsvermögen reduziert und der gemessene Fangstoß ansteigt (mehr dazu in analyse:berg Winter 2021/22, Sturz ins Seil).

Prüfmethode und die Belastung sind so ausgelegt, dass mindestens fünf Stürze bruchfrei überstanden werden müssen, um die Mindestanforderungen zu erfüllen. Dabei sind die Prüfparameter um ein Vielfaches härter, als dies in der Praxis der Falls sein wird:

- Das Seil ist fest eingespannt, es gibt also keinerlei Bremswirkung wie durch ein Sicherungsgerät. Lediglich das Dehnungsvermögen des Seiles und das Zusammenziehen des Knotens werden zur Energie-

umwandlung beitragen.

- Die Karabinerkante ist komplett starr fixiert und wird sich nicht wie z. B. eine Expressschlinge mit Karabiner bewegen. Die Umlenkkante ist mit einem Kantenradius von 5 mm und einem Krümmungsradius von 20 mm nahezu analog zu Karabinern in der Praxis.
- Das Sturzwgewicht ist eine starre Fallmasse. Im Vergleich dazu ist der menschliche Körper quasi ein „nasser Sack“, was wiederum Energie umwandelt.
- Der Sturzfaktor ist im Vergleich zur Praxis mit 1,71 sehr hoch.

Prinzipiell beschreiben die Mindestanforderung mit fünf bruchfrei zu überstehenden Normstürzen und die Fangstoßlimits für Einfach-, Halb- und Zwillingsseil sehr hohe Sicherheitsreserven. Trotzdem ereigneten sich, auch in der jüngeren Vergangenheit, Seilrisse auf verschiedenste Arten.

Wo liegen die Grenzen der Sicherheitsreserven?

Mit welchen Prüfungen lassen sich nun die Sicherheitsreserven ermitteln und praxisrelevant umsetzen? Ein Seilriss über eine Karabinerkante wird bei einem intakten Seil nicht stattfinden. Intakt heißt, der Mantel weist keine Beschädigung innerhalb der Belastungslänge auf und der Kern ist nicht durch inneren Abrieb vorgeschädigt.

Das wiederum heißt, ein Seilriss wird nur erfolgen, wenn zusätzlich negative Parameter – wie z. B. scharfe Kanten – auftreten.

Die ersten Untersuchungen zur Scharfkantenproblematik

Dass geringere Kantenradien und auch qualitative Unterschiede schneller zum Seilriss führen, wurde schon Mitte der 70er-Jahre des vorigen Jahrhunderts in einem Artikel mit dem Titel „Seil ist nicht gleich Seil“ von Pit Schubert, im Tätigkeitsbericht 1974–1979 des

Da sich Seilrisse in der Regel bei Belastung über Felskanten ereignen, Felskanten sich aber nicht nach der UIAA-Norm richten, lag es nahe, den Radius der Umlenkkannte (Karabinerkante) an der Fallprüfanlage stufenweise zu verkleinern, um so ein Maß für das Kantenerbeitsvermögen eines Seiles bei schärferer Kantenbelastung zu erhalten. Die dynamische Seilprüfung (Fallprüfung) wurde deshalb über Kanten mit 5, 4, 3, 2 und 1 mm Radius durchgeführt, um so die Kennlinie des Kantenverhaltens eines Seiles zu ermitteln. Es wurden von jedem Seiltyp drei Proben über die gleiche Kante belastet und die jeweils niedrigste Anzahl ausgehaltener Stürze für die Erstellung der genannten Kennlinie herangezogen. Eine Kennlinie von Mittelwerten wäre nicht realistisch; im Ernstfall kann auch der weniger gute Seilabschnitt - von dem man vor einer Sturzbelastung bzw. vor einer zerstörenden Prüfung gar nicht sagen kann, wo er sich befindet - belastet werden.

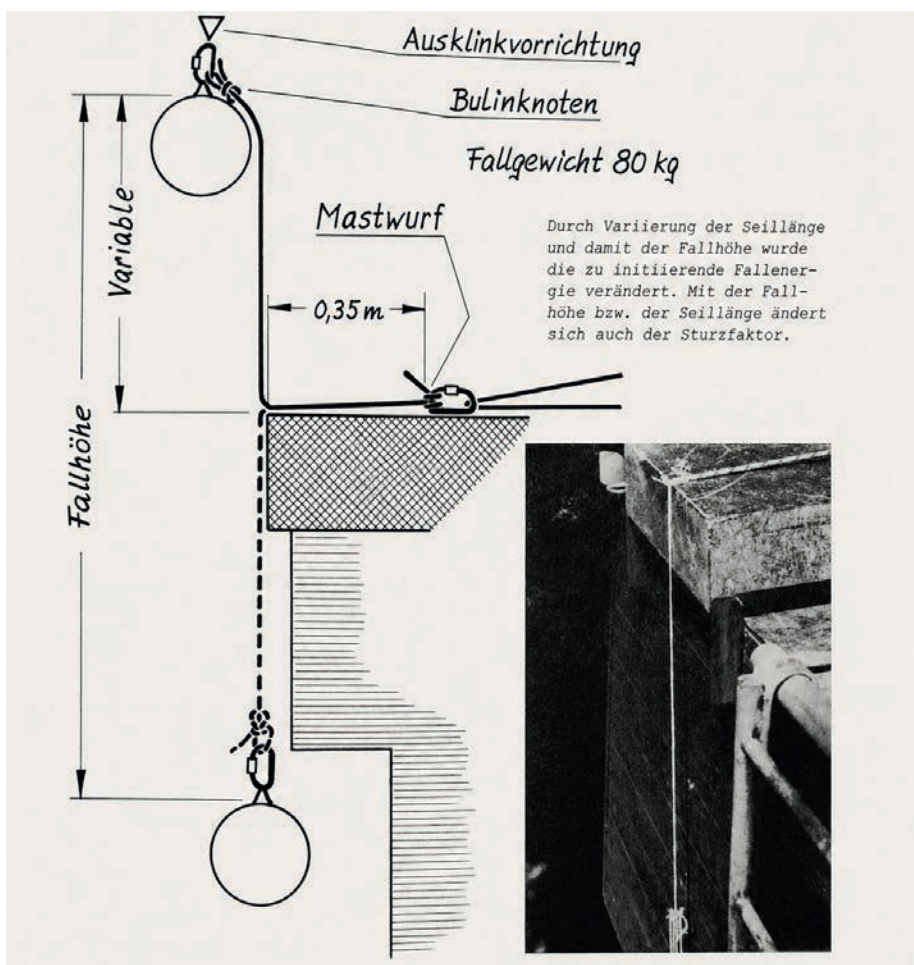


Abb. 1: Bereits Mitte der 1970er-Jahre führte Pit Schubert im DAV-Sicherheitskreis Untersuchungen zu Seilrissen an scharfen Kanten durch. Quelle: Sicherheitskreis im DAV, Tätigkeitsbericht 1974–1979, Deutscher Alpenverein

Sicherheitskreises des DAV veröffentlicht. Eine sehr interessante Passage aus diesem Bericht ist in **Abb. 1** abgedruckt. In den damaligen Untersuchungen wollte man sich dann noch mehr der Praxis annähern. Die Prüfungen über die Kantenradien wurde nur als eine erste Annäherung an die Seilbelastung über Felskanten betrachtet, so dass in Folge weitere

Gleichzeitig wurde das Prüfziel dahingehend variiert, nicht mehr die Anzahl der gehaltenen Stürze als Ergebnis zu werten, sondern das Kantenarbeitsvermögen durch eine Variierung der Fallhöhe zu ermitteln, d. h. ab welcher Sturzenenergie das Seil über der Kante reißt.

UIAA 108 SCHARFKANTENTEST

Der Test UIAA 108 (**Abb. 2**) wurde nach einer langer Diskussionsphase seit 1987 (!) schließlich 2002 als freiwilliger UIAA-Scharfkantentest eingeführt. Allerdings wurde er 2004 wieder gestrichen, da Zweifel an der Reproduzierbarkeit geäußert wurden, insbesondere was die Veränderung des Kantenradius betraf, was jedoch diskutabel ist.

Im Aufbau entsprach der Test dem der Normsturzprüfung:

- Das Seil ist fest eingespannt, d. h. lediglich das Dehnungsvermögen des Seiles und das Zusammenziehen des Knotens tragen zur Energieumwandlung bei.
- Das Sturzwgewicht ist eine starre Fallmasse.
- Der Energieeintrag (ca. 3,7 kJ) ist analog zur Normsturzwprüfung mit einem Sturzfaktor von 1,71 sehr hoch.
- Im Unterschied zur Normsturzwprüfung erfolgt die Belastung über eine horizontale Kante (Kantenradius 0,75 mm).

BEWERTUNG

Aufgrund der hohen Bewegungsenergie und der aktiven² dynamischen Belastung entstehen ähnlich hohe Kräfte (Fangstoß, Sturzzug und vektorielle Addition an der Kante) wie beim Normsturz.

Der Mechanismus des Versagens wird als „dynamisches Scheren“ (**Abb. 3**) bezeichnet, d. h. durch die sich beim Abfangen aufbauende Fangstoßkraft und der damit verbundenen Fangstoßdehnung kommt es zu einer Relativbewegung des Seiles über die Kante (👉 Videoclip ÖKAS-Website). Gleichzeitig baut sich direkt proportional zum Fangstoß eine Scherkraft aus der vektoriellen Addition von Fangstoß und Sturzzug auf, wodurch auch ein hoher Druck, insbesondere auf die Mantelgarne, wirkt.

Druck = Kraft pro (Auflage-)Fläche.
d. h. beim Sturz über eine „scharfe“ Kante
ist aufgrund des sehr kleinen Krümmungs-
radius die (Auflage-)Fläche deutlich kleiner
als bei einem Karabiner mit einem
Kantenradius von 5 mm.

Parallel dazu wird der kreisrunde Seilquerschnitt an der horizontalen Kante im Vergleich zum Normsturz noch flacher gedrückt⁵.

Scherkraft und Druck wirken sich zeitlich betrachtet zuerst auf den an der Kante aufliegenden Anteil des Seilmantels aus, da dieser quasi zwischen „Hammer und Amboss“ liegt, also zwischen Kante und dem Seilkern.

Übersteigt die Scherkraft die Festigkeit des Mantelgeflechts, wird dieses zuerst durchgeschert und die Kernelemente liegen ungeschützt auf (**Abb. 4**).

Je nachdem wie viel Bewegungsenergie bereits umgewandelt wurde, kann es ab diesem Zeitpunkt zu einer Reißverschlussreaktion kommen. Reißen einer oder mehrere Kernzwirne, steigt in Folge die Scherspannung auf die restlichen, was schließlich zum kompletten Riss führen kann.

ERGEBNISBETRACHTUNG

Genau betrachtet ist dieser Test eigentlich ein absoluter KO-Test mit einer singulären Belastungssystematik durch eine lineare Relativbewegung des Seiles über

die Kante. Der Anteil an lateraler Bewegung ist praktisch null, d. h. es wird ein Scheren unter extremen dynamischen Prüfbedingungen an der horizontalen Kante betrachtet. Die Prüfbedingungen sind prinzipiell „überextrem“.

Unabhängig davon, dass dieser Test nicht mehr in den UIAA-Normen geführt wird, führte die Firma Tendon weitere Untersuchungen durch, wobei die Kante aus extrem hartem Stahl gefertigt war und vor jedem Test der Kantenradius akribisch überprüft wurde. Vor allem aber wurden die Kriterien, wann ein Sturz als „bruchfrei“ überstanden wird, sehr eng gefasst: Es durften nicht mehr als 20 Prozent der Kernzwirne und nicht mehr als 50 Prozent der Mantelfäden beschädigt sein.

So wurden auch selbst bei Einfachseilen mit Seildurchmesser < 10 mm (z. B. Tendon Master Pro 9,7 mm) noch zwei (!) gehaltene Stürze im Einzelstrang erzielt. Tendon prüfte u. a. auch Statikseile über die scharfe Kante analog zur UIAA 108, jedoch mit einem reduzierten Fangstoß ($F_i = 0,89$).

Diese Ergebnisse lassen nicht unbedingt eine Korrelation zwischen

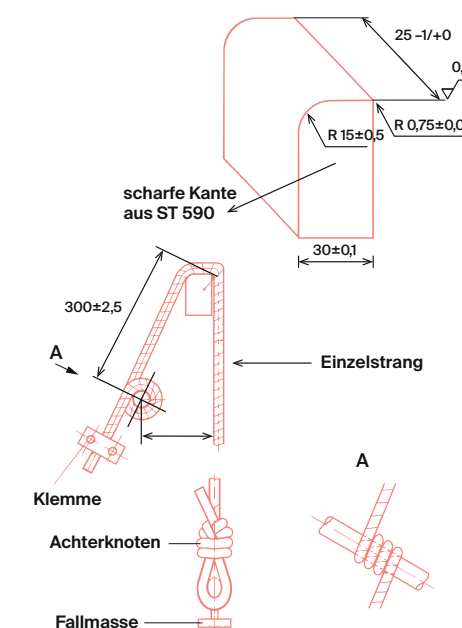


Abb. 2: UIAA 108 Scharfkantentest.

Abb. 3: Dynamische Scherung beim UIAA 108 Scharfkantentest.

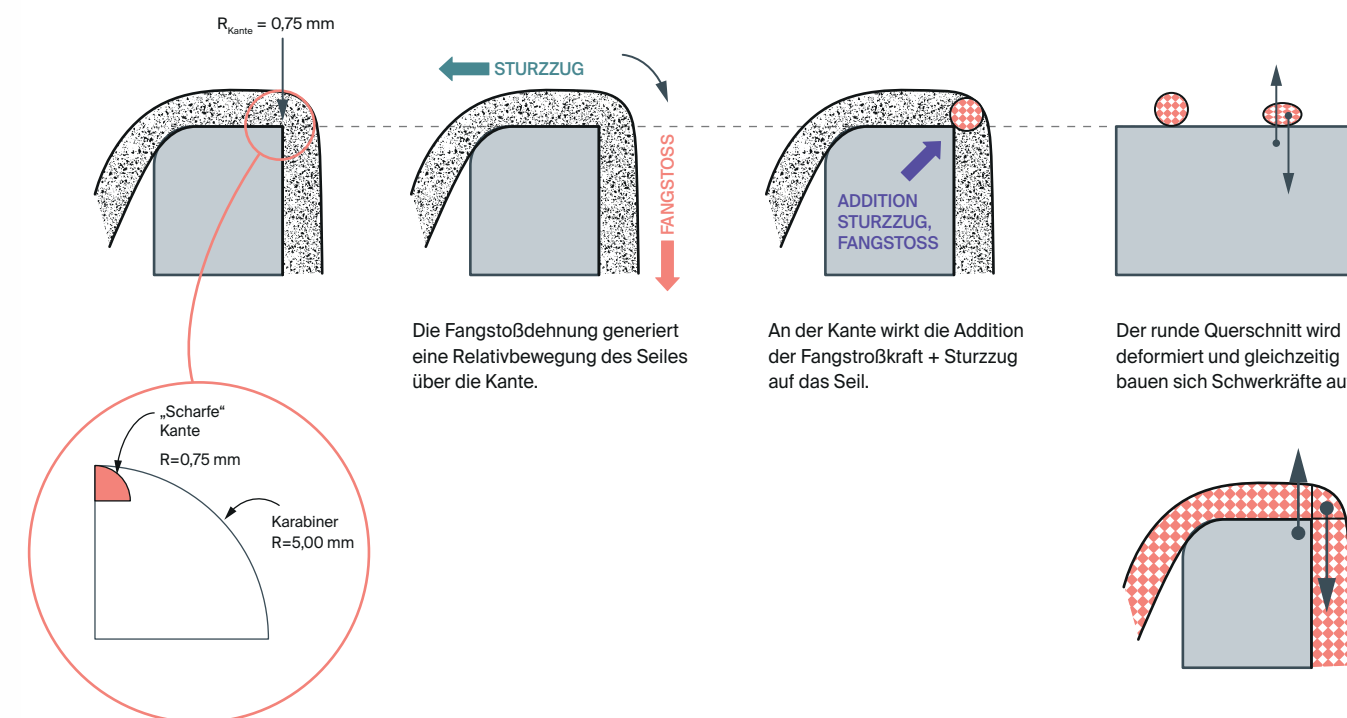




Abb. 4: Kompletter Mantelriss beim UIAA 108 Scharfkantentest. Foto: Tendon, J. Hazda

Seildurchmesser und ausreichend hoher Widerstandsfähigkeit, einen Kantentsturz entsprechen UIAA 108 bruchfrei zu überstehen, zu. Sie zeigen aber ansatzweise, dass – bei entsprechender Fertigungstechnik und konstruktiver Konzipierung bis hin zur Hydrophobierung – es im Durchmesser Bereich < 10 mm durchaus möglich ist, dass Seile diese dynamische Scherung überstehen können.

UIAA 101 SCHARFKANTENTEST

Der UIAA 101 aktuell implementierte Scharfkantentest ist – im Gegensatz zum UIAA 108 Test – nicht als KO-Test konzipiert, sondern greift eine Idee auf, die schon im Untersuchungsbericht von 1977–1979 in rudimentärer Form angewandt wurde, nämlich das Kantearbeitsvermögen eines Seiles zu ermitteln. Der Aufbau ist prinzipiell analog zum Scharfkantentest nach EN 108, allerdings mit kleinen Abweichungen (Abb. 5):

- Das Seil ist fest eingespannt.
- Das Seil wird nicht am Fallgewicht eingeknotet, sondern mit U-Klemmen verpresst, wodurch auch der dämpfende Effekt des Zusammenziehens des Knotens eliminiert wird.
- Das Sturzwgewicht ist eine starre Fallmasse mit 100 kg.
- Der Energieeintrag ist analog zur Normsturzprüfung, aber die freie Seillänge zwischen der Seilklemme und der Kante ist um 200 mm länger. Dadurch entsteht ein marginal geringerer Sturfaktor.

- Die horizontale Karabinerkante ist starr fixiert – mit einem Kantenradius von $0,75$ mm –, aber nach der 30° Ansmiegung ist die Distanz bis zur $0,75$ mm Kante deutlich kürzer, wodurch der Schereffekt noch stärker ist.
- Der verwendete Stahl der Prüfkante muss mindesten eine Härte von 52 HRC (Hardness Rockwell) aufweisen.

Unter diesen Bedingungen werden alle Seile reißen, aber anhand einer computergestützten Differentialrechnung des Fangstoß/Fangzeit-Verlaufs bis zum Riss wird das Energieaufnahmevermögen ermittelt.

Dies hier jetzt detailliert mathematisch zu beschreiben, würde den Rahmen sprengen, kann aber bei Interesse auf der UIAA-Website nachgelesen werden (www.theuiaa.org).

Das Ergebnis dieses Tests wird in kJ/m angegeben, also wie viel (Bewegungs-) Energie das Seil bis zum Bruch in der Lage wäre „aufzunehmen“.

BEWERTUNG

In diesem vergleichenden Test, bei dem prinzipiell alle Seile reißen, treten eine extrem hohe Bewegungsenergie und eine

aktive dynamische Belastung auf. Das dabei ermittelte Kantearbeitsvermögen ist aber unterschiedlich hoch.

Der Mechanismus des Versagens ist dynamisches Scheren.

ERGEBNISBETRACHTUNG

Dieser Test stellt eine harte Prüfung mit analoger singulärer Belastungssystematik wie beim alten UIAA 108 Test dar, nur noch härter. Es wird prinzipiell nur das dynamische Scheren betrachtet, aber mit grundsätzlicher Vergleichbarkeit durch das ermittelte Kantearbeitsvermögen.

Bei allen dynamischen „Scharfkantentests“ (UIAA 108, UIAA 101) treten sehr hohe Kräfte auf, die in der Praxis in dieser Form kaum vorkommen. In Abb. 6 ist beispielhaft für den UIAA 101 Test ein Kräftediagramm abgebildet.

„Schnitt“-Prüfungen

Mit der intensiveren Betrachtung der Versagensmechanik legte sich das Augenmerk auch auf die Schnittfestigkeit. Die Schnittbelastung unterscheidet sich dabei von der (dynamischen) Scherbelastung durch eine laterale Bewegung zu einer Kante, bei der das Seil unter vergleichsweise geringer (mechanischer) Spannung steht.

Abb. 5: UIAA 101 Scharfkantentest.

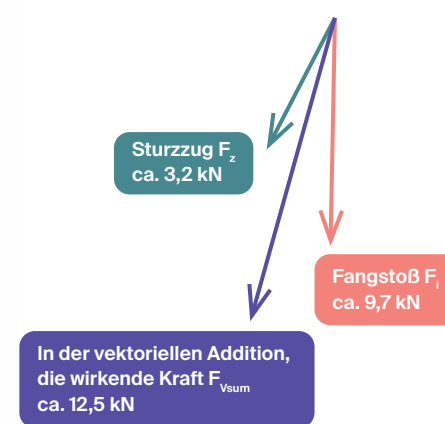
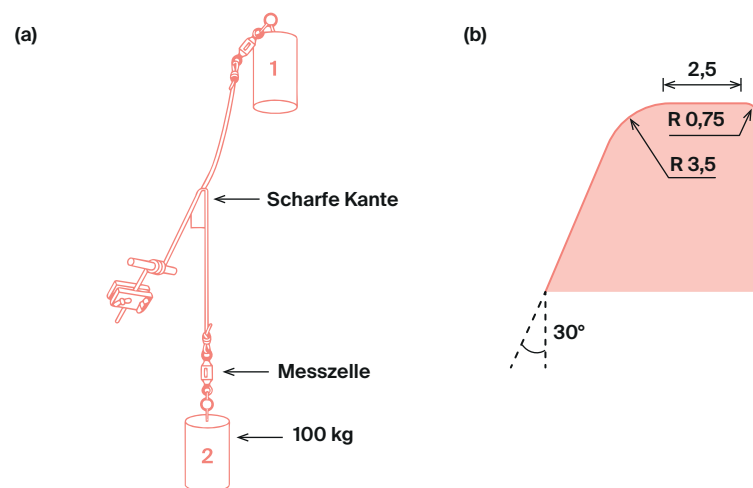


Abb. 6: Mögliches Kräftediagramm beim UIAA 101 Scharfkantentest mit einer Kantenumlenkung von 30° .

ELMENDORF-PENDELSCHLAGTEST

Der Elmendorf-Pendelschlagtest wurde von Mammut und der EMPA (Eidgenössische Materialprüfanstalt) entwickelt und basiert auf einem Pendelschlagwerk, das mit einer scharfen Klinge versehen ist (Abb. 7).

Bei diesem Test ist das Seil im Vergleich zu den Tests UIAA 108 und UIAA 101 quasi passiv und das Prüfmittel – das Pendelschlagwerk – ist mit einer extrem scharfen Kante aktiv (👉 [Videoclip ÖKAS-Website](#)):

- Das Seil wird in einer Zugprüfmaschine mit 10 kN kontinuierlich vorgespannt.
- Das Elmendorf-Pendelschlaggerät ist so modifiziert und positioniert, dass eine scharfe Klinge (Klingenradius $0,07$ mm) in einem Schnittwinkel von 55° zum Seil an einem Pendel fixiert wird. Das Pendelgewicht mit der Klinge wird ausgelenkt und die Pendelrotation freigegeben. Die Klinge trifft im Vergleich zum UIAA 101/108 Test mit relativ geringer Bewegungsenergie ($8,9$ J) auf das Seil.
- Das Seil wird dabei durchtrennt und das Pendel bewegte sich weiter, bis die restliche Bewegungsenergie aufgebraucht ist. Durch eine Messzelle wird die Schnittkraft ermittelt.

BEWERTUNG

Es handelt sich um keinen KO-, sondern um einen vergleichenden Test, da prinzipiell alle Seile durchtrennt werden, aber die dabei ermittelten Schnittkräfte unterschiedlich hoch sind. Der Mechanismus des Versagens ist komplexer, als man meinen möchte, und sehr stark von der Vorspannung des Seiles abhängig.

Im Vergleich zu den aktiv dynamischen Scharfkantentests werden bei diesem Test aufgrund der beidseitigen

Einspannung des Seiles der Querschnitt bzw. die Kernzwirne auch dann mehr oder minder gebündelt bleiben, wenn der Mantel durchtrennt wird. Das wiederum bedingt, dass die extrem scharfe und im Winkel angeordnete Klinge zuerst die zur Kante liegenden Mantelfäden und dann die äußeren Kernzwirne durchschneidet. Dadurch verteilt sich die mechanische (Vor-)Spannung zeitlich versetzt auf die verbleibenden Kernzwirne, wodurch diese wiederum noch mehr vorgespannt und damit noch leichter durchtrennt werden, weil sich Zugkraftüberlastung und Schnittbelastung überlagern.

ERGEBNISBETRACHTUNG

Statische Kräfte wie die zur Prüfung kontinuierlich aufgebraute Vorspannung von 10 kN werden in dieser Größenordnung kaum in der Praxis auftreten.

Seile mit Aramidfasern im Mantel werden bei diesem Test – aufgrund der sehr hohen Vorspannung, welche vorzeitig zum Bruch der Aramidgarne führen kann – u. U. sogar schlechter abschneiden bzw. nicht unbedingt eine signifikant bessere Pendelschlag-Schnittresistenz zeigen.

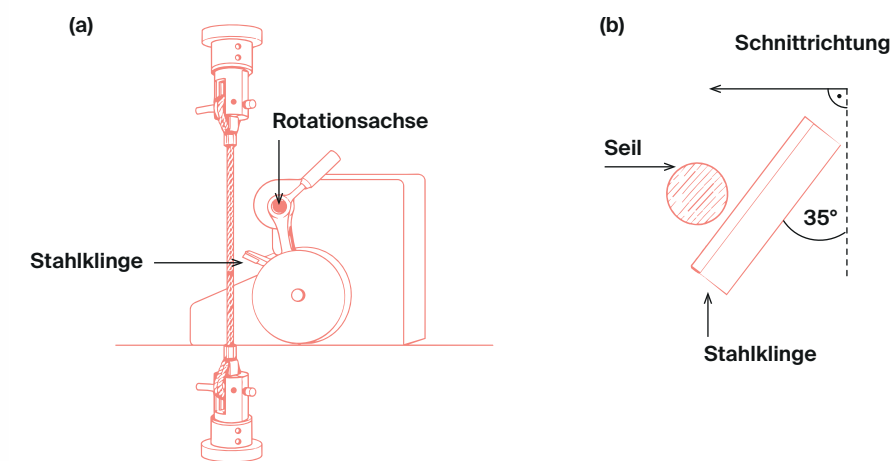
Dazu noch eine andere Betrachtung, die prinzipiell jeder selbst an einem alten Seil ausprobieren kann:

Legen Sie ein Seil lose auf einen festen, stabilen Untergrund und versuchen Sie, es mit einem Messer durchzuschneiden. Hängen Sie nun im Vergleich 80 kg an das Seil und schneiden sie es durch.

Der Unterschied wird schnell zeigen, wie sich eine Schnittbelastung mit scharfer Klinge unter schon deutlich geringerer Vorspannung als die im Pendelschlagtest fatal auswirken kann, während beim losen Seil richtig viel Aufwand nötig ist. Bei Kappbergungen in der Berg- und Luftrettung ist daher immer höchste Konzentration von Nöten.

Ergänzend dazu ist auch der Bericht von Pit Schubert in „Sicherheit und Risiko in Fels und Eis – Band II“ (S. 108 ff) interessant, in dem er beschreibt, was passiert, wenn man mit den Steigeisen auf ein Seil tritt. Nämlich genau nichts, da das Seil keine mechanische Vorspannung hat.

Abb. 7: Elmendorf-Pendeltest.



TESTS AN DER HORIZONTALEN KANTE MIT LATERALER BEWEGUNG

Zum Thema Scher- und Schnittbelastung wurden bereits von der DAV-Sicherheitsforschung in der DAV-Panorama Ausgabe 05/2016 Ergebnisse publiziert. Auch Edelrid veröffentlichte 2017 zu diesem Thema den Artikel „Untersuchung der Schnittfestigkeit von Bergseilen in Abhängigkeit der Last“ (vgl. bergundsteigen #99, Sommer 2017).

Das Seil läuft dabei im 40°-Winkel über eine definierte 90°-Metallkante mit Einkerbungen und wird mit unterschiedlichen Gewichtsbelastungen (80, 120 und 160 daN) gespannt. Die Kante wird lateral zum Seil hin und her bewegt, das Seil selbst bleibt dabei quasi stationär, während sich das Prüfmittel bewegt.

BEWERTUNG

Es handelt sich um keinen KO-, sondern um einen vergleichenden Test, da prinzipiell alle Seile durchtrennt werden und die dabei ermittelte Schnittlänge unterschiedlich hoch ist.

Das Versagen (Durchtrennen) wird prinzipiell durch eine – in Bezug auf den Seilquerschnitt betrachtet – indirekte laterale Bewegung des Seiles über eine scharfe Kante ausgelöst. Also eine Kombination von quasistatischer, linear mechanischer Spannung und lateraler Schnitteinwirkung mit, im Vergleich zu den Sturzttests, prinzipiell sehr geringer Bewegungsenergie.

ERGEBNISBETRACHTUNG

Der quasistatische Gewichtskraftbereich von 80 bis 160 daN lässt natürlich keinen Vergleich zu einer dynamischen Betrachtung zu, zeigt aber deutlich, dass auch relativ geringe mechanische Spannung bei lateraler Bewegung eine durchaus nicht zu unterschätzende Schnittbelastung und damit verbundenes Versagensrisiko ergeben!

Die Ergebnisse zeigen u. a., dass die „Schnittfestigkeit“ von Bergseilen überproportional (!) zur Lasterhöhung abnimmt. Bei gleichbleibenden Seilumlenkwinkel bedingt eine Verdoppelung der Gewichtskraft von 80 auf 160 daN eine

Reduktion der gemessenen Schnittlänge um 600 Prozent!

Dass es bei entsprechender Parameterkombination auch bei relativ geringer (nahezu quasistatischer) Belastung mit gleichzeitig lateraler Bewegung des Seiles über eine relativ stumpfe Kante zu einem kompletten Versagen kommen kann, zeigt ein Unfall am Nesthorn (vgl. bergundsteigen 2021/8, S. 62ff).

Teufelberger-Testmethode zur Schnittfestigkeit an der horizontalen Kante
Teufelberger führt ähnliche Untersuchungen durch, jedoch mit abgewandelten Parametern:

- Als Kante wird eine rohe, unbehandelte Granitkante verwendet.
- Das Seil läuft im 90°-Winkel um eine definierte Metallkante.
- Das Seil wird mit einer Gewichtsbelastungen von 80 kg beaufschlagt.
- Die Kante bleibt stationär und das Seil wird lateral zu dieser hin und her bewegt.
- Technisch betrachtet ist das eine indirekte Lateralbewegung des Seiles über eine Kante.
- Dabei wird die „Schnittfestigkeit“ bei unterschiedlichen Seilumlenkwinkel (30°, 45°, 65°) untersucht.

BEWERTUNG

Auch hier handelt es sich um keinen KO-, sondern um einen vergleichenden Test, da prinzipiell alle Seile durchtrennt werden

und die dabei ermittelte „Schnittlänge“ unterschiedlich hoch ist.

Anders als beim zuvor beschriebenen Versuchsaufbau von Edelrid wird hier nicht die Kante bewegt, sondern das Seil jeweils seitlich ausgelenkt. Prinzipiell erfolgt dabei keine absolut punktuelle Schnittbelastung. Durch den Auslenkwinkel ergibt sich ein Bewegungsradius, so dass sich das Seil in einem Kreissegment – also überlagernd lateral und linear – über die Kante bewegt, wodurch sich auf einer eng begrenzten Fläche eine Schnitt- und Abriebbelastung ergibt.

Die Erhöhung der Seilumlenkung von 30° auf 65° bewirkt eine Erhöhung der Anpresskraft an der Kontaktfläche Seil/Granit von 40 daN (30°) auf etwa 80 daN (65°) und führt zu einer Festigkeitsreduktion je nach Seildurchmesser um den Faktor ca. 2,5 (gemessen bei einem 9,9 mm Einfachseil) bzw. um den Faktor 3,5 (gemessen bei einem 9,1 mm Einfachseil).

ERGEBNISBETRACHTUNG

Die von Teufelberger verwendete Granitkante kann natürlich nicht als „reproduzierbar“ betrachtet werden, aber die Ergebnisse bzw. grundsätzlichen Aussagen kann man bezogen auf die Praxis durchaus als relevant einstufen. Der Versuchsaufbau mit Seilauslenkung über die Kante – also die dadurch generierten Schnitt-/Abriebüberlagerung – ist dabei noch praxisaffiner als eine punktuelle Belastung.

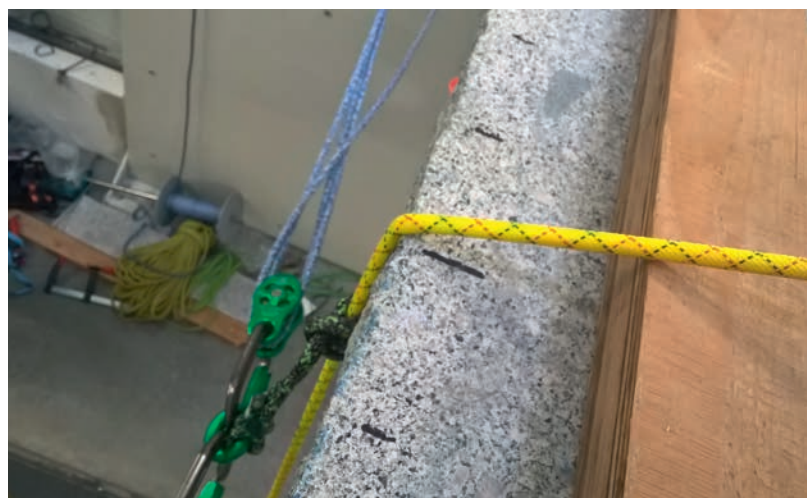


Abb. 8: Teufelberger-Testmethode zur Schnittfestigkeitsprüfung an einer horizontalen Granitkante mit seitlich ausgelenktem Seil. Foto: Teufelberger

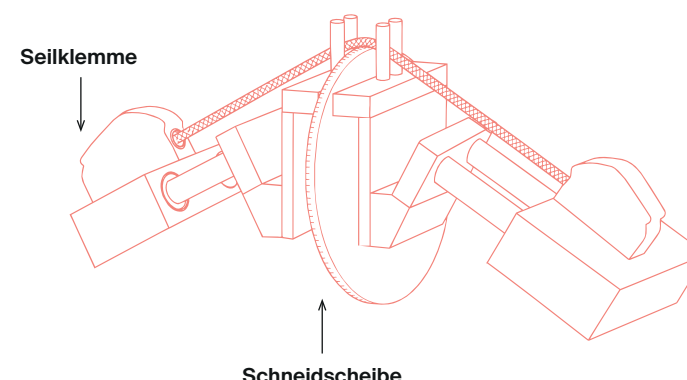


Abb. 9: Edelrid-Schnitttradtest. Abbildung: Mit freundlicher Unterstützung von D. Sedlacek und A. Stöhr

EDELRID-SCHNITTTRADTEST

Edelrid hat, um seine Prüfmethode zur Schnittfestigkeit von Seilen noch weiter zu verfeinern, einen Test kreiert, bei dem die Seile unter kontinuierlicher mechanischer Spannung auf einem rotierenden Rad mit definierter Kante aufliegen, um so eine absolut punktuelle Schnittbelastung zu erzeugen (Abb. 9).

Das Seil läuft dabei im 120°-Winkel über die Kante eines Schnitttrads und hat folgenden Aufbau:

- Seilspannung 100 daN.
- Die Kante wird lateral zum Seil hin und her bewegt, das Seil selbst bleibt quasi stationär.
- Auch hier gibt es eine indirekte Lateralbewegung des Seiles über eine Kante.
- Ergänzend dazu wurden Prüfungen mit einem stumpferen Winkel von 160°, aber bei höheren Seilspannungen von 150 und 200 daN, durchgeführt.

BEWERTUNG

Diese Versuchsanordnung ist kein KO-Test, sondern ein vergleichender Test, da prinzipiell alle Seile durchtrennt werden und die dabei ermittelten „Schnittlängen“ unterschiedlich hoch sind.

ERGEBNISBETRACHTUNG

Auch hier wird, trotz der geringen mechanischen Spannung (1- bis 2-fache

Körperlast), bei lateraler Bewegung ein durchaus nicht zu unterschätzendes Versagensrisiko dargestellt!

Die Praxisrelevanz aller drei Schnittuntersuchungen fokussiert sich vor allem auf Anwendungsformen, bei denen Seile – insbesondere im Einzelstrang und unter mechanischer Spannung stehend – lateral über Felskanten laufen (Abb. 10).

Überlagernde dynamische Scher- und Schnittbelastung

Betrachtet man die bisher beschriebenen Tests, dann liegt es nahe, beide Belastungsmechanismen – also Scher- und Schnittbelastung – zu kombinieren. Das Kompetenzzentrum für Alpendienste der Schweizer Armee hat in einem Prüfaufbau eine Sturzsituation kreiert, die das nachstellt und bei der das Seil bei einer Sturzbelastung mit „nur“ Sturfaktor 0,7 durch ein Prüfgewicht von 96 kg über eine schräge Granitkante gezogen wird (👉 Videoclip ÖKAS-Website).

MODIFIZIERTE „SCHWEIZER ARMEE“-TESTANORDNUNG

Teufelberger hat sich zusammen mit Mammut das Verhalten bzw. Versagen der Seile näher angesehen und den Test im eigenen Prüflabor mit etwas variierten Parametern nachgestellt.

- Anordnung siehe Abb. 11.
- Prüfmasse 80 kg.
- Sturfaktor 0,3 bei einer gesamten Seillänge von 3 m.
- Prüfkante aus Granit.
- Das Seil wird mit Klebeband im entlasteten Zustand am Kontaktpunkt zur Kante fixiert, um immer mit dem gleichen Startpunkt zu beginnen.

BEWERTUNG

Es handelt sich um eine aktive dynamische Belastung mit relativ geringem Fangstoß im Vergleich zu UIAA 108/101.

Die gemessenen Kräfte (Sturzzug, Fangstoß, Addition) sind höher als beim Schnitttest, aber deutlich geringer als bei den Scharfkantentests EN 108 und EN 101.

Der Mechanismus des Versagens sind sich überlagernde Scher-, Schnitt- und Abriebmechanismen, da die dynamische Belastung gleichzeitig laterale Bewegung des Seiles entlang der schrägen Kante bedingt.

Abb. 10: In der Praxis besteht das Problem der Schnittfestigkeit v. a., wenn gespannte Seile seitlich über scharfe Felskanten belastet werden. Zwei Seilstränge – wie auf dem Foto – reduzieren die Gefahr eines Seilrisses massiv. Foto: Bernt Prause



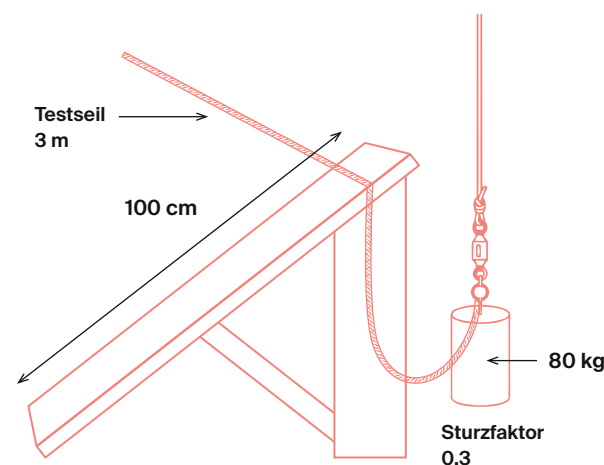


Abb. 11: Überlagernde dynamische Scher- und Schnittbelastung nach der von Teufelberger und Mammut modifizierten Versuchsanordnung eines Tests der Schweizer Armee.

Betrachtet man die Zeitlupenaufnahmen dieser Testanordnung (👉 [Videoclip ÖKAS-Website](#)), erkennt man u. a. Folgendes:

- Ab dem Moment, wo der Sturzzug das Seil – bedingt durch die Schräge – über die Granitkante zieht, werden die Mantelgarne durchtrennt.
- Die Kernzwirne arbeiten ab dem Moment, in dem der Seilmantel zu ca. 50 Prozent zerstört ist, nicht mehr im Verbund und reiben sich entlang der Kante auf.
- Im weiteren Verlauf des Sturzzugs werden die Kernzwirne mehr oder minder nacheinander belastet und durchtrennt.

ERGEBNISBETRACHTUNG

Natürlich muss man auch hier klar sagen, dass eine Granitkante niemals ein Prüfmittel sein wird, das eine Reproduzierbarkeit garantiert. Aber trotz allem handelt es sich zweifelsohne um einen Ansatz, der eine sehr hohe Praxisaffinität erreicht.

Teufelberger und Mammut haben Seile aus eigener Produktion vergleichend getestet, u. a. Standardkonstruktionen (Kern Polyamid & Mantel Polyamid) und auch das Mammut CoreProtect (Innenmantel aus Hybridgarn Aramid/PA). Beim Mammut-CoreProtect Seil bleiben die Kernzwirne durch den Innenmantel geschützt und arbeiten im Verbund,

so dass das Seil unter diesen Testbedingungen nicht reißt (👉 [Videoclip ÖKAS-Website](#)).

Zuletzt noch eine alpinfernere, aber dennoch interessante Versuchsanordnung:

BESCHUSSTEST

Tendon hat auch Untersuchungen angestellt, inwieweit vorgespannte Seile bei Beschuss reagieren (👉 [Videoclip ÖKAS-Website](#)). Prinzipiell hat dies mit der alpinen Praxis rein gar nichts zu tun, aber die Erkenntnisse sind doch verblüffend! Der Versuchsaufbau ähnelt dem des Pendelschlagversuchs:

- Das Seil wird mit einer Gewichtskraft von 1 kN kontinuierlich vorgespannt.
- Anstelle der Klinge am Pendelschlagwerk wird ein Projektil mit Kaliber 9 mm auf das Seil abgeschossen.
- Die Projektilgeschwindigkeit beträgt dabei ca. 350 bis 450 m/s (!) mit einer Projektilenergie von ca. 300 bis 550 J.

BEWERTUNG

Das Projektil durchdringt Seilmantel und -kern, ohne dass das Seil durchtrennt wird. Dabei werden lediglich ca. 10 Prozent der Mantelgarne an der Austrittsseite beschädigt. Trotz der Vorspannung

werden die Mantelgarne und Kernzwirne durch die enorme punktuelle Projektilenergie auseinandergedrückt.

ERGEBNISBETRACHTUNG

Trotz der hohen Beaufschlagung (Projektilgeschwindigkeit und -energie) entsteht ein relativ geringer Schaden und der Kern bleibt intakt.

Ein Versuch, dies zu interpretieren: Das Projektil stellt im engeren Sinne keine (scharfe) Kante dar, sondern ein an der Spitze kugelförmiges Gebilde, das auf Grund seiner Form die Fasern einfach zur Seite schiebt.

Abschließende Betrachtung

Prinzipiell stellen die Ergebnisse der hier beschriebenen Tests nur einen Teilaspekt der gesamten Thematik dar. Diese jeweils für sich allein als Kriterium heranzuziehen, um eine erhöhte Scharfkanten- oder Schnittfestigkeit in der Produktbeschreibung eines Seiles auszuweisen, lässt aber noch Fragen offen. Z. B., ob ein Seil mit sehr hoher Schnittlänge auch eine überlagernde dynamische Schnitt-/Scherbelastung übersteht – dies sollte ebenso betrachtet werden.

Dynamische Tests mit sehr hohem Energieeintrag und entsprechend hohen Reaktionskräften können genau genommen nicht mehr als praxisaffin betrachtet werden. UIAA 108 ist dabei absolut selektiv und schickt Seile ab einem Durchmesser von 9,5 mm und kleiner mit großer Sicherheit ins KO. Das würde einen sehr großen Teil der Einfachseile am Markt aussondern, obwohl diese u. U. gute oder sogar sehr gute Werte z. B. bei den Schnittests aufweisen oder auch an der schrägen Kante noch „überleben“.

UIAA 101 wird an einer scharfen Kante durchgeführt und es ergeben sich für jedes Seil unterschiedliche Werte hinsichtlich des Energieaufnahmevermögens. Damit ist der Test nicht selektiv, sondern vergleichend, wobei mit nahezu absoluter Sicherheit angenommen werden kann, dass die Prüfparameter in der Praxis so niemals auftreten werden und hohes Energieaufnahmevermögen nicht

unbedingt mit hoher Schnittresistenz korrelieren muss.

Der Test an der schrägen Granitkante ist sehr praxisaffin, insbesondere, da sich bei diesem Verfahren Scher- und Schnittbelastung überlagern. Die Granitkante ist kein sauber reproduzierbares Prüfmittel, könnte aber durch eine hochqualitative, definierte Metallkante ersetzt werden, um so ein technisch einwandfreies und reproduzierbares Prüfverfahren zu erzielen. Als Gegenargumente kann man ev. anführen, dass die dynamische Dehnung der Seile unterschiedlich hoch ist und sich damit etwas, das z. B. für einen niederen Fangstoß gut ist, bei dieser Prüfung u. U. als ungünstig erweisen könnte. Trotz allem erscheint dieser Ansatz sehr sinnvoll und sollte weiterverfolgt werden.

Der Schnittrad-Test ist wiederum ein quasistatischer Test mit singulärer Betrachtung der Schnittfestigkeit. Hier werden hochfeste Fasern wie Aramid sicherlich ihre speziellen Eigenschaften ausspielen. Aber auch beim Teufelberger-Test mit Seilauslenkung über die Granitkante und der damit verbundenen Überlagerung von Schnitt- und Abriebbelastung wäre es interessant, eine definierte Metallkante zu verwenden, um eine bessere Reproduzierbarkeit zu erzielen.

Durch den vermehrten Einsatz von Aramid-Anteilen im Seilmantel zur Verbesserung der Schnittresistenz bzw. mit Zwischenmänteln aus Hybridgarn mit Aramid, um die Schnitt-/Scher-Performance zu erhöhen, wird hier vermutlich doch einiges neu zu betrachten und abzuwägen sein.

Völlig unabhängig davon, nach welcher aktuellen oder künftigen Testmethode Scharfkantenfestigkeiten oder besondere Schnittfestigkeiten ausgewiesen werden, bedeutet dies auf keinen Fall 100-prozentige Sicherheit!

Die Seilhersteller arbeiten daran, ihre Produkte kontinuierlich weiterzuentwickeln und deren Performance zu verbessern, aber für die Sicherheit ist letztendlich jeder Anwender selbst verantwortlich.

Die sicherheitstechnisch unbedenklichkeitserlegende Wollmilchsau wird es nicht geben.

DANK & LINKS

Die im Text erwähnten Videoclips können von analyse:berg-Abonnenten auf der Website des ÖKAS angesehen werden. Dort haben wir den gesamten Beitrag inkl. aller Links etc. online gestellt. Danke an Ben von www.HardisEasy.com für die Video-Clips!



Videoclips
ÖKAS-Website

Für alle, die gerne noch Tiefergehendes zu diesem Thema lesen wollen, nachfolgend zwei besonders interessante wissenschaftliche Abhandlungen:

„Cut resistance of climbing ropes – A comparative analysis of existing measurement methods and a simulated accident“, von **Daniel Sedláček und Adriana Stöhr**, bei denen ich mich besonders für ihre Unterstützung bedanke!



Hier nachzulesen.

„On the analysis of cut resistance in polymer-based climbing ropes: New testing methodology and resulting modes of failure“, von **A. Andrés Leala, Rolf Stämpfli, Rudolf Hufenus**.



Hier nachzulesen.

- 1 Die in der UIAA 101 beschriebenen Zusatzanforderungen sind nicht zwingend vom Hersteller zu erfüllen, stellen aber zusätzliche Qualitätskriterien ergänzend zur EN 892 für Bergseile dar.
- 2 Mit dem ergänzenden Begriff „aktive“ dynamische Belastung soll der Unterschied zum später beschriebenen Pendelschlag und dem Schnittest dargestellt werden. Bei den dynamischen Sturztests bilden das Sturzgewicht und das daran fixierte Seil eine sich bewegende Einheit. D. h. die Prüfkante ist starr fixiert, bei einem Sturz fällt das Seil auf die Kante und wird dynamisch belastet und gedehnt (Fangstoßdehnung). Reißt das Seil nicht, wird das Sturzgewicht wieder hochgeschleudert, also im Seil gespeicherte Dehnungsenergie wieder abgegeben, bis Seil und Prüfgewicht in einer Art gedämpfter Schwingung zur Ruhe kommen. Im Vergleich dazu wird z. B. bei den Schnittests und dem Pendelschlagtest das Seil vorgespannt, bleibt in Ruhe und das Prüfmittel bewegt sich.
- 3 Würde man bei der Normsturzsprüfung eine horizontale Kante verwenden, würde sich das ebenso in einer etwas geringeren Sturzzahl auswirken.