

Polyamid 6

Lebensfaser

der Alpinisten

Sicherheit beim Klettern



Maturaarbeit 2015, Gymnasium Münchenstein
Anja Bieler, Klasse 3AB
Betreuer: Guido Tarrach

Inhaltsverzeichnis

ABSTRACT	4
VORWORT.....	5
MOTIVATION	5
DANKSAGUNGEN	6
REDLICHKEITSERKLÄRUNG	6
EINLEITUNG	7
1. THEORIE.....	8
1.1 RISIKOSPORTART KLETTERN?	8
1.1.1 Statistiken Bergsport	8
1.2 GEFAHREN BEIM ALPINEN KLETTERN	10
1.2.1 Einteilung	10
1.2.2 Objektive Gefahren	10
1.2.3 Subjektive Gefahren	10
1.3 DAS SICHERUNGSMATERIAL.....	11
1.3.1 Klettergurt	11
1.3.2 Bergseil.....	11
1.3.3 Karabiner	12
1.3.4 Klemmgeräte	12
1.3.5 Schlingen	13
1.3.6 Sicherungs- und Abseilgeräte.....	15
1.3.7 Helm.....	17
1.4 ABGENUTZTES MATERIAL	17
1.4.1 Seilverschleiss	18
1.4.2 Eingeschliffene Expressen	22
1.5 FORMELN UND HERLEITUNGEN	23
1.5.1 Statische Belastung	23
1.5.2 Sturzfaktor	23
1.5.3 Seildehnung.....	23
1.5.4 Fangstoss	24
1.5.5 Spannungs-Dehnungs-Diagramm	25
1.5.6 Zugfestigkeit.....	26
2. BESUCH DES TESTLABORS DER MAMMUT SPORTS GROUP AG	27
2.1 DER SEILTEST.....	27
2.2 GETESTET WIRD:	27
2.2.1 Abzug	27
2.2.2 Seildurchmesser.....	27
2.2.3 Metergewicht	28
2.2.4 Sturzzahl.....	28
2.2.5 Fangstoss	28

2.2.6	Gebrauchsdehnung	28
2.2.7	Dehnung im ersten Sturz	29
2.2.8	Mantelverschiebung	29
2.2.9	Knotbarkeit	29
2.2.10	Wasseraufnahme	30
2.2.11	Scharfkantenfestigkeit	31
3.	MODELLVERSUCHE	32
3.1	ELASTIZITÄT	32
3.1.1	Versuch 1a	32
3.1.2	Versuch 1b	33
3.2	SCHARFKANTENFESTIGKEIT	39
3.2.1	Versuch 2a	39
3.2.2	Versuch 2b	41
4.	DISKUSSION DER RESULTATE	43
4.1	RISIKO	43
4.2	PHYSIK BEI STÜRZEN	43
4.3	TESTMETHODEN DER MAMMUT SPORTS GROUP AG	45
	SCHLUSSWORT	45
	ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS UND GLOSSAR	46
	LITERATURLISTE UND ABBILDUNGSVERZEICHNIS	46
	BÜCHER UND ZEITSCHRIFTEN	46
	INTERNET	46
	ANDERES	48
	ABBILDUNGEN	48
	TABELLEN	49
	ANHANG	50

Abstract

Klettern ist eine Sportart, die mit grossen Risiken verbunden ist. Jedes Jahr kommen Alpinisten auf Bergtouren ums Leben. Die Unfallursachen können sehr unterschiedlich sein.

Das Sicherungsmaterial ist die Lebensversicherung der Kletterer. Bei einem Sturz wirken grosse Kräfte auf die einzelnen Teile der Sicherungskette.

In meiner Maturaarbeit habe ich mich mit den Gefahren des Kletterns auseinandergesetzt. Ich habe Unfallstatistiken studiert und nach den Ursachen für die Unfälle gesucht. Zudem habe ich verschiedene Situationen beim Klettern physikalisch betrachtet. Ich wollte herausfinden, welche Kräfte bei einer statischen Belastung oder bei einem Sturz auf das Seil wirken. An dünnen Seilfasersträngen führte ich Modellversuche zur Elastizität und zur Scharfkantenfestigkeit von Polyamid 6, dem Seilmaterial, durch. Die Resultate und Beobachtungen versuchte ich mit meinen hergeleiteten Formeln zu bestätigen.

Es ist mir gelungen eine Formel für den Fangstoss, die maximale bei einem Sturz auf das Seil wirkende Kraft, herzuleiten. Jedoch enthält diese den Elastizitätsmodul, eine Materialkonstante, die zum Beschreiben des linear-elastischen Verhaltens des Materials dient. Der E-Modul gilt somit nicht mehr, sobald eine plastische Verformung stattfindet, was bei einem sehr harten Sturz aber der Fall ist. Mit meinen demnach nur annähernd korrekten Formeln und den Messergebnissen habe ich die Zugfestigkeit und den Elastizitätsmodul von Polyamid 6 errechnet. Diese habe ich mit den Materialkennwerten von Stahl verglichen. Ich kam zu einer logischen Folgerung:

Die Zugfestigkeit von Stahl ist ein wenig höher als die von Polyamid 6. Deshalb ist es sinnvoll für statische Konstruktionen, die grosse Lasten tragen müssen, Stahlseile zu verwenden. Dafür hat Polyamid 6 einen deutlich kleineren E-Modul, was bedeutet, dass es elastischer ist. Elastizität ist eine wichtige Eigenschaft von Kletterseilen, da ein Sturz abgefedert und der Fangstoss geringgehalten werden muss. Diese Phänomene sind aus dem Alltag nicht unbekannt, jedoch habe ich in meiner Maturaarbeit gelernt, die physikalischen Hintergründe zu verstehen.

Um zu sehen, wie Seile vor dem Verkauf getestet werden, besichtigte ich das Seiltestlabor der Mammut Sports Group AG. Dort durchlaufen die Seile diverse Tests und sie werden mehrmals von Sensoren nach Fehlern abgesucht. Es ist theoretisch nicht möglich, dass ein Defekt unentdeckt bleibt. Man darf also davon ausgehen, dass die verkauften Seile halten, was sie versprechen. Jedes Kletterseil ist irgendwann so abgenutzt, dass es nicht mehr gebraucht werden sollte. Deshalb ist es wichtig, das eigene Seil regelmässig zu kontrollieren.

Die Schlussfolgerung meiner Arbeit ist, dass die Sicherheitslücken im Bergsport nicht bei fehlerhaftem Sicherungsmaterial sondern im menschlichen Versagen oder Fehlverhalten liegen.

Vorwort

In meiner gesamten Maturaarbeit gelten personenbezogene Begriffe als geschlechtsneutral. Zugunsten der Verständlichkeit des Textes habe ich immer nur eine Form aufgeschrieben.

Motivation

In meiner Freizeit bin ich oft in den Bergen unterwegs. Ich mache Ski- und Hochtouren und klettere für mein Leben gern. Unter diesen Umständen war es eigentlich naheliegend, eine Maturaarbeit zum Thema Bergsport zu schreiben. Trotzdem kam ich lange nicht auf die Idee. Ich wusste anfangs nur, dass ich unbedingt etwas machen wollte, bei dem ich auch praktisch arbeiten konnte. Auf keinen Fall wollte ich eine reine Recherchearbeit. Mir war klar, dass ich unbedingt ein Thema wählen musste, das mich wirklich interessiert und etwas mit mir zu tun hat. Immer wenn ich eine neue Idee hatte, stellte ich mir die Frage: „Kann ich mich ein halbes Jahr lang mit diesem Thema beschäftigen, ohne dass es mir verleidet?“ Ich musste viele Ideen wieder verwerfen und hatte lange das Gefühl, dass ich nie das Richtige für mich finden würde.

Ich wusste, dass ich etwas machen wollte, das mit meinen Hobbies zu tun hat, also entweder mit dem Saxophonspielen oder mit dem Bergsport. Am Ende war es meine Schwester, die mich auf die Idee brachte, mein Schwerpunktfach Physik mit dem Klettern zu verbinden.

Meine Grundidee war es, mich mit den Kräften zu beschäftigen, die beim Klettern in verschiedenen Situationen wie Vor- und Nachstieg sowie beim Abseilen wirken. Jedoch entschied ich mich dann, mich mit dem Thema zu beschäftigen, das mich beim Klettern am meisten beschäftigt: Sicherheit beim Klettern. Ich litt früher unter starker Höhenangst und kann mich noch an viele Situationen erinnern, in denen ich durch meine Angst zu blockiert war, um weiter zu klettern. Ich hatte zwar keine bewusste Angst vor einem Sturz, aber trotzdem wollten mir meine Arme und Beine nicht mehr gehorchen. Es war als ob mein Körper und nicht ich selbst Angst hätte. Ich konnte ihn nicht beruhigen, obwohl mir vollkommen bewusst war, dass ich gesichert war und nicht abstürzen konnte. Ich hatte Mühe dem Seil zu vertrauen, wenn es nicht ganz straff angezogen war, weil es sich dann so anfühlte, als ob es gar nicht da wäre. Heute habe ich nur noch sehr selten Probleme mit der Höhe und meiner Meinung nach ist es richtig, einen gewissen Respekt vor Höhe zu haben.

Im Herbst 2012 ist ein Bergführer, den ich aus meinem ersten JO-Kletterlager kannte, beim Klettern tödlich verunglückt. Das Seil ist bei einem Sturz in einen eingeschliffenen Expresskarabiner gerissen. Dieser Vorfall hat mich sehr beschäftigt und es macht mich traurig, dass die fixen Expressen im Klettergarten nicht rechtzeitig ersetzt wurden. Der Unfall hätte durch regelmässige Wartung der Route vermieden werden können.

Obwohl es noch andere Faktoren gibt, die die Sicherheit beim Klettern beeinflussen, ist für mich das Sicherungsmaterial einer der wichtigsten. Auf die meisten anderen Faktoren haben wir wenig Einfluss und sie sind auch weniger berechenbar. Durch richtig verwendetes, intaktes Sicherungsmaterial kann und soll das Risiko gering gehalten werden.

Dem Sicherungsmaterial vertraut ein Kletterer sein Leben an. Dies wird einem beispielsweise bewusst, wenn man nach einer Mehrseillänge beim Abseilen frei und hilflos im Seil baumelt. Das Bergseil ist ein faszinierendes Konstrukt. Es ist nicht besonders dick und trotzdem fängt es die schlimmsten Stürze auf. Deshalb ist das Seil für mich eine Art Lebensfaden des Kletterers.

Ich habe mich entschieden, den Schwerpunkt meiner Arbeit auf das Bergseil und allgemein auf das Sicherungsmaterial zu legen.

Für mich war es eine unglaubliche Erleichterung, endlich mein Thema zu haben. Ich hatte gefunden, was ich wollte: Ein Thema, das mit meiner Freizeit zu tun hat und auch mit praktischem Arbeiten verbunden werden konnte.

Danksagungen

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mich bei meiner Maturaarbeit unterstützt haben. Mein Dank gilt in erster Linie Herrn Guido Tarrach für die Betreuung meiner Arbeit und die Unterstützung in allen physikalischen Angelegenheiten, wobei mir in dieser Hinsicht auch Patrick Bachmann, der Physikassistent, bei der Durchführung der Modellversuche eine grosse Hilfe war.

Ich möchte mich auch bei der Mammut Sports Group AG und speziell bei Frau Katalin Dozsa vom Rope Development herzlich für die Führung im Testlabor bedanken. Vielen Dank auch dem Zentrum für Mikroskopie der Universität Basel (ZMB) dafür, dass ich hier Rasterelektronische Aufnahmen der Seilfasern machen durfte.

Ausserdem möchte ich auch meiner Familie herzlich für die guten Ideen und die moralische Unterstützung danken. Zu guter Letzt noch ein herzliches Dankeschön an alle die, die meine Arbeit gelesen und korrigiert haben.

Redlichkeitserklärung

„Ich bestätige, dass ich diese Arbeit selbstständig durchgeführt habe. Fremdbeiträge sind als solche klar bezeichnet. Verwendete Hilfsmittel und Quellen sind nach den Regeln des wissenschaftlichen Arbeitens in den angefügten Verzeichnissen aufgelistet.“

Ort, Datum

Unterschrift

Einleitung

„Passt gut auf euch auf und kommt heil zurück!“ Diesen Satz bekommen viele Bergsteiger zu hören, wenn wieder einmal eine grössere Tour geplant ist. Die Berge wirken auf uns majestätisch und mysteriös, aber auch bedrohlich. Die magische Anziehungskraft der Berggipfel bringt Alpinisten dazu Risiken auf sich zu nehmen. Die Erfahrungen, die sie auf ihren Touren gewinnen, sind für sie unbezahlbar.

Ich beschäftigte mich in meiner Maturaarbeit mit den Risiken und Gefahren im Bergsport. Dazu studierte ich Unfallstatistiken und informierte mich in Büchern und Magazinen über die Sicherheit beim Klettern. Zudem beschäftigte ich mich mit der Frage, wie weit das Eingehen von Risiken im Bergsport vertretbar ist.

Sicherheit ist ein Grundbedürfnis des Menschen. Es gibt fast kein Risiko für das noch keine Sicherheitsmassnahme erfunden wurde. So ist es auch mit den Gefahren im Bergsport. Im Jahr 1953 produzierte die Firma Edelrid das erste Kernmantelseil – ein Meilenstein in der Evolution des Sicherungsmaterials.¹ Ständig wird es weiterentwickelt und optimiert. Grosse Hersteller von Bergsportausrüstung übertrumpfen sich gegenseitig mit neueren und sichereren Innovationen. Diese Entwicklung wird wahrscheinlich kein Ende nehmen, bevor nicht die absolut sichere Ausrüstung erfunden wurde.

In meiner Arbeit befasste ich mich mit dem Sicherungsmaterial und vor allem mit dem Bergseil. Ich wollte wissen, welche Kräfte bei einem Sturz oder bei einer statischen Belastung auf das Seil wirken. Mich interessierten die Eigenschaften, die ein Bergseil haben sollte. In diesem Teil der Arbeit erzielte ich die Resultate mit verschiedenen wissenschaftlichen Methoden wie Modellversuchen und Herleitungen. Als Grundlage für die Herleitung der Formeln dienten mir meine Kenntnisse aus dem Physikunterricht. Diese waren zwar nicht ausreichend spezifisch, jedoch boten sie mir zusammen mit ein wenig Eigenrecherche zu Materialeigenschaften wie Elastizitätsmodul und Zugfestigkeit eine gute Basis.

Die Strukturen der Fasern eines Bergseils konnte ich am Zentrum für Mikroskopie der Universität Basel (ZMB) unter einem Rasterelektronenmikroskop genauer betrachten.

Ich wollte ausserdem wissen, wie gewährleistet wird, dass ein Bergseil einem Sturz tatsächlich standhalten kann. Um das herauszufinden, besuchte ich das Seiltestlabor der Mammut Sports Group AG in Seon. Dort lernte ich die Testmethoden der Firma kennen und konnte mich auch noch genauer informieren, was den Aufbau und die Produktion von Bergseilen betrifft.

Somit konnte ich ein einheitliches Thema mit mehreren unterschiedlichen Arbeitsmethoden untersuchen. Ich recherchierte in Büchern, Magazinen und im Internet, ich stellte Fragen bei meinem Besuch im Testlabor, untersuchte Seilfasern unter dem Rasterelektronenmikroskop und ich führte selbst wissenschaftliche Modellversuche durch.

¹ Edelrid: <http://www.edelrid.de>

1. Theorie

1.1 Risikosportart Klettern?

Keine Diskussion, Klettern ist nicht ungefährlich. Es ist aber übertrieben, es als Risikosportart zu bezeichnen. Es ist verständlich, dass Free-Solo-Klettern zu den Risikosportarten gehört, aber beim Klettern mit Seil ist man besser abgesichert als in den meisten anderen Sportarten und somit wird das Risiko relativ gering gehalten.

Deshalb wird Klettern offiziell nur als relatives und nicht als absolutes Wagnis klassifiziert. Trotzdem können Versicherungsgeldleistungen bei Unfällen um mehr als 50 % gekürzt werden, wenn Vorsichtsgebote in schwerwiegender Weise missachtet werden. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn eine Tour trotz extrem ungünstiger Wetterlage durchgeführt wird.²

1.1.1 Statistiken Bergsport ³

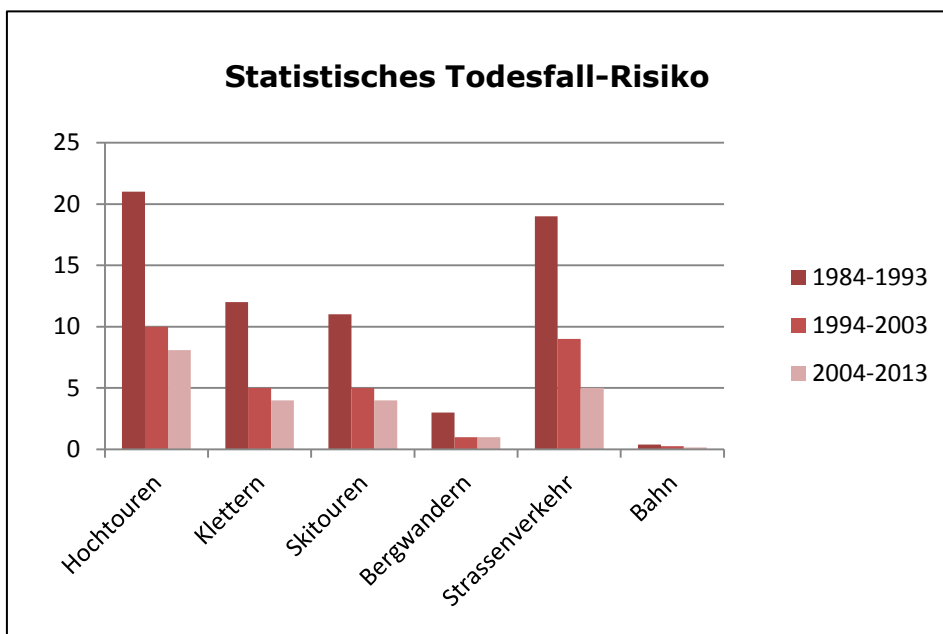


Abb. 1: Statistisches Todesfall-Risiko

Diese Statistik bestätigt die Behauptung einiger Bergsteiger und Bergsteigerinnen, dass die An- und Rückreise gefährlicher sei als die Ausübung des Bergsports. Einzig wenn es um Hochtouren geht, liegen sie falsch.

² SUVA: <http://www.suva.ch>

³ Risiko Bergsteigen: Mosimann, 2014

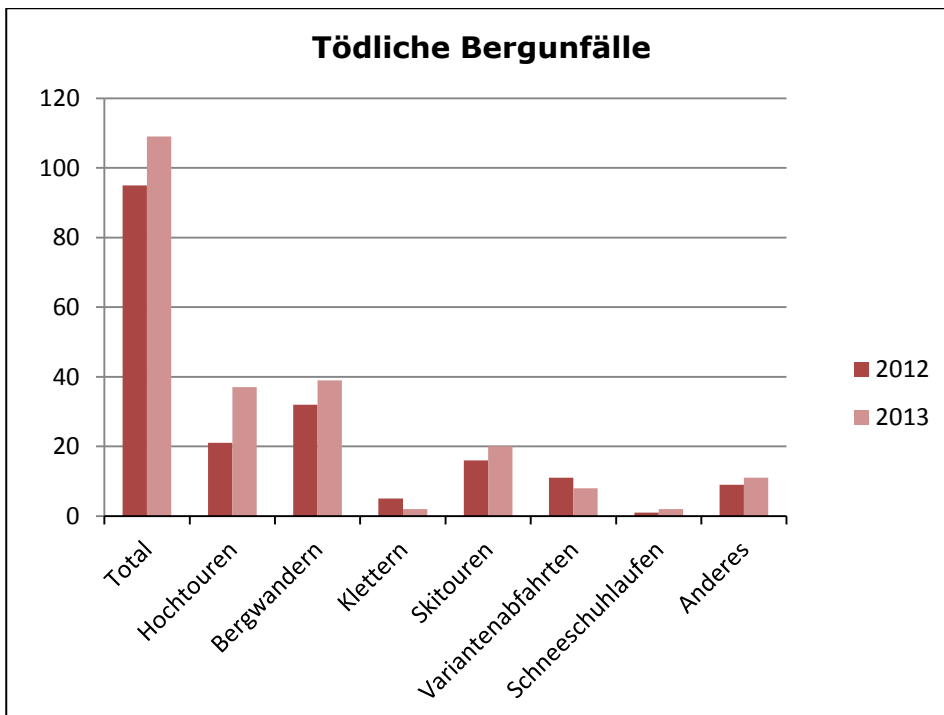


Abb. 2: Tödliche Bergunfälle

In diesem Diagramm wird ersichtlich, dass Klettern verglichen mit anderen Bergsportarten sehr wenig Tote fordert. Das liegt daran, dass man beim Klettern die besten Möglichkeiten hat, sich selbst zu schützen. Beim Bergwandern und auf Ski- und Hochtouren ist man öfter Gefahren wie Lawinen und Wechtenabbrüchen ausgesetzt und zudem sind die Sicherungsmöglichkeiten im Schnee beschränkter.

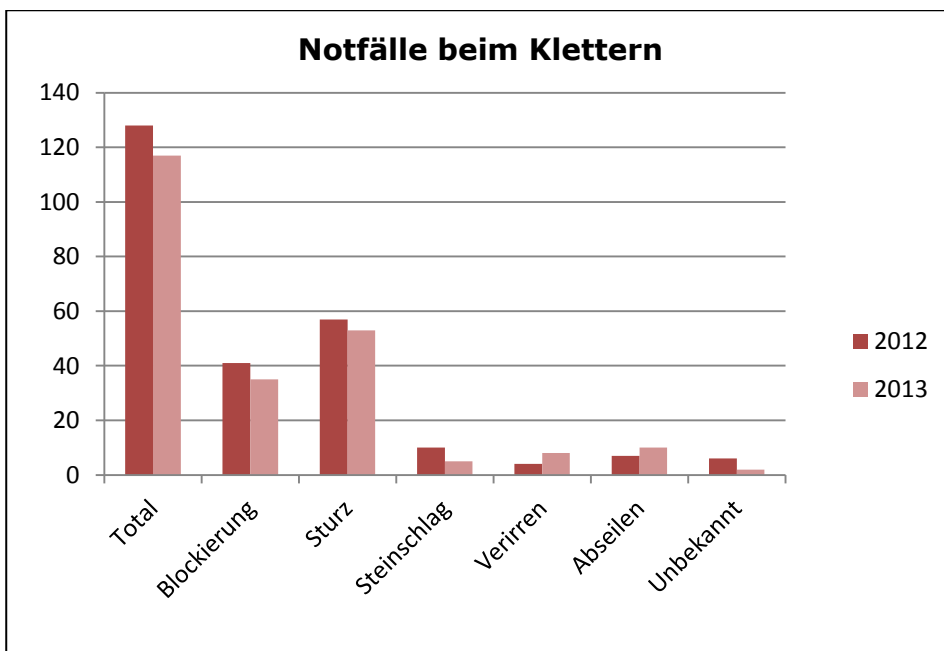


Abb. 3: Notfälle beim Klettern

Die häufigste Notfallursache beim Klettern ist der Sturz ins Seil, aber auch Blockierungen sind nicht selten ein Grund zur Alarmierung. Auch Steinschlag, Verirren und falsches Abseilen können Kletterer in eine Notlage bringen.

1.2 Gefahren beim alpinen Klettern ⁴

1.2.1 Einteilung

Die Gefahren im alpinen Bereich können in zwei Kategorien unterteilt werden: Gefahren, die durch den Menschen hervorgerufen werden, nennt man subjektive Gefahren. Die objektiven Gefahren werden von der Umgebung verursacht.

1.2.2 Objektive Gefahren

Die Natur kann ungeahnte Gefahren bergen. Das *Wetter* ist ein sehr unberechenbarer aber ausschlaggebender Faktor, der bei der Planung einer Klettertour berücksichtigt werden muss. In den Bergen ist die *UV-Strahlung* sehr intensiv und deshalb ist es wichtig, sich besonders gut vor der *Sonne* zu schützen. Plötzliche Hitzeschläge in Mehrseillängen schränken die körperlichen Fähigkeiten der Kletternden und Sichernden ein und können deshalb fatale Folgen haben. Genügend zu trinken, ist vor allem im Sommer ein Muss auf jeder Mehrseillänge. *Starker Wind* oder ein *Sturm* schränken das Leistungsvermögen und vor allem auch die Kommunikation zwischen den Kletterpartnern massiv ein und sollten darum gemieden werden. Auch vor *Niederschlägen* und *Kälte* sollte man sich schützen um Unterkühlungen vorzubeugen. Um sich vor *Blitzen* in Sicherheit zu bringen, ist es wichtig, Gipfeln, Graten und anderen exponierten Stellen auszuweichen. Eine weitere Gefahr bergen die Sicherheitsmaterialien aus Metall und Wasserläufe, wegen ihrer hohen elektrischen Leitfähigkeit. *Steinschlag* ist der häufigste objektive Auslöser von Kletterunfällen. Wegen verschiedenen Verwitterungsprozessen gibt es viele lose Gesteinsbrocken, die durch äussere Einwirkungen zum Steinschlag werden können. Meistens wird Steinschlag aber durch Kletterer ausgelöst. Deshalb könnte man Steinschlag auch als eine subjektive Gefahr sehen.

1.2.3 Subjektive Gefahren

Ein Kletterer muss sich nicht nur auf sich selbst, sondern auch auf seinen Seilpartner oder seine Seilpartnerin verlassen können. Fehler beim Sichern können fatale Folgen haben und dürfen nicht passieren. Richtiges Sichern kann nicht aus Büchern oder durch Zuschauen erlernt werden. Es ist wichtig, die Sicherungstechniken ausgiebig zu üben, weil *mangelhafte Erfahrung* eine grosse Gefahr darstellen kann.

Um eine Route erfolgreich meistern zu können, ist eine gewisse *Grundkondition und Fitness* nötig. Durch gründliches Aufwärmen vor dem Klettern kann das Verletzungsrisiko erheblich gesenkt werden.

In einer Schrecksituation reagiert unser Körper meist automatisch. Leider reagiert er teilweise auch falsch. *Angst und Stress* beeinträchtigen unsere Kontrolle und stellen dadurch eine Gefahr dar.

Auch Fehleinschätzungen und grosse Risikobereitschaft können zu Unfällen führen. *Schlechtes oder fehlerhaftes Material* gibt es heutzutage praktisch nicht mehr. Jedoch kann es bei falscher Verwendung oder zu starker Abnutzung nicht mehr seine ursprüngliche Funktion erfüllen. Man sollte sich deshalb regelmässig vergewissern, ob das Sicherungsmaterial noch intakt ist.

⁴ Alpin-Lehrplan: Hoffmann et al, 2003 (S.90-93)

1.3 Das Sicherungsmaterial

1.3.1 Klettergurt ⁵

Beim Sportklettern ist der Hüftgurt die verbreitetste Form des Klettergurts. Die kombinierte Anseiltechnik „Hüft- und Brustgurt“ ist eher selten anzutreffen. Sie ist jedoch gut geeignet für übergewichtige Personen oder Kinder, weil bei diesen die Hüften für den normalen Hüftgurt zu wenig stark ausgeprägt sind.

Auch Kombigurte werden im Sportkletterbereich nur selten verwendet.

Hüft- oder Sitzgurt

Hüftgurte sind nicht grundlos das verbreitetste Modell. Sie sind fast für jede Art des Bergsports geeignet und bieten eine gute Bewegungsfreiheit beim Klettern.

Sie bestehen aus den Beinschlaufen, die einen grossen Teil der Sturzlast tragen und aus dem Hüftverschlussband, das die Wirbelsäule stützt.

Angeseilt und gesichert wird am Anseilring. Am Verschlussband um die Hüfte gibt es zudem mehrere Materialschlaufen (meistens vier).

Beim Partnercheck muss darauf geachtet werden, dass der Klettergurt richtig sitzt, dass alle Gurtbänder zurückgeschlauft sind und dass das Seil richtig eingebunden ist.

1.3.2 Bergseil

Bergseile werden aus Polyamid 6 (Nylon) hergestellt. Sie bestehen aus einem Mantel und dem Kern. Der Kern ist aus 7-12 Einlagezwirnen aufgebaut, der Mantel besteht aus circa 40 Zwirnen.

Bei einem Sturz nimmt der Kern etwa 70-80% und der Mantel 20-30% der Kraft auf. Zudem schützt der Mantel das Seil vor Abrieb.⁶

Es gibt drei verschiedene Seiltypen:

Das Einfachseil ist das Seil, das wohl am meisten benutzt wird. Es ist einfach handzuhaben und wird beim Sportklettern, Eisklettern, auf Klettersteigen, Hoch- und Gletschertouren verwendet. Halbseile sind dünner als Einfachseile und werden als Paar benutzt. Sie sind äusserst praktisch auf Mehrseillängen. Es können einfach Dreierseilschaften gebildet werden, weil an jedem Seilstrang ein Nachsteiger gesichert werden darf. Beim Vorstieg darf die Halbseiltechnik zur Absicherung verwendet werden, um die Seilreibung zu vermindern. Bei der Halbseiltechnik wird immer nur abwechselungsweise ein Strang eingeklinkt. Zudem sind Halbseile sehr nützlich beim Abseilen, da mehr Seillänge zur Verfügung steht und somit in einmal Abseilen mehr Strecke zurückgelegt werden kann.

Diesen Vorteil bringen auch die noch etwas dünneren Zwillingseile. Sie dürfen jedoch nicht einzeln gebraucht werden und können deshalb nicht zum Nachsichern zweier Nachsteiger verwendet werden. Auch für die Halbseiltechnik sind Zwillingseile zu dünn. Es müssen immer beide Stränge eingehängt werden.⁷

⁵ Klettergurt: <http://www.mammut.ch>

⁶ Testlabor

⁷ Bergsport Sommer: Winkler et al, 2006

1.3.3 Karabiner⁸

Karabiner sind wichtige Elemente der Sicherungskette. Bei richtiger Verwendung halten sie jeder beim Klettern auftretenden Belastung stand. Richtige Verwendung bedeutet, dass der Schnapper geschlossen ist und dass der Karabiner in Längsrichtung belastet wird.

Karabiner mit Verschlussicherung

Wenn die Sicherung nur durch einen einzelnen Karabiner läuft, muss ein Schraubkarabiner oder ein anderer Karabiner mit Verschlussicherung verwendet werden.

Nicht alle verschlussgesicherten Karabiner sind als HMS-Karabiner geeignet. Es sollten nur dafür vorgesehene Karabiner für die HMS-Sicherung verwendet werden.

Expressschlingen

Expressschlingen bestehen aus zwei Karabinern, die durch eine Schlinge verbunden sind.

Beim Vorstiegsklettern wird der hakenseitige Karabiner in die Bohrhaken am Fels eingeklinkt. Dann wird das Seil in den zweiten Karabiner eingehängt.

Bei korrekter Verwendung sind die Schnapper beider Karabiner vom Fels und vom Kletterer weggerichtet. Das Seil kommt von hinten durch den unteren Karabiner und läuft dann weiter zum Kletterer. Querbelastungen der Karabiner müssen unbedingt verhindert werden, da sie sonst brechen können.

Der hakenseitige Karabiner sollte einen geraden Schnapper und keine ausgeprägte Nase haben und nicht in der Schlinge fixiert sein. Er sollte sich in der Schlinge frei bewegen können und somit rasch aus ungünstigen Positionen zurückkehren können. Der seilseitige Karabiner hingegen sollte mit einem Fixiergummi in der richtigen Position gehalten werden, damit Verdrehungen verhindert werden können. Ausserdem sind die seilseitigen Karabiner oft gebogen, was das Einhängen erleichtert. Je leichter der Schnapper und je grösser die Federspannung ist, desto geringer ist das Risiko, dass sich der seilseitige Schnapper bei einem Aufschlag auf dem Fels öffnet. Die Karabiner haben offen eine geringere Festigkeit und können somit brechen, wenn der Schnapper sich bei einem Aufprall öffnet. Am sichersten sind leichte Drahtschnapper mit einer starken Feder und einer hohen Schnapper-offen-Festigkeit.⁹

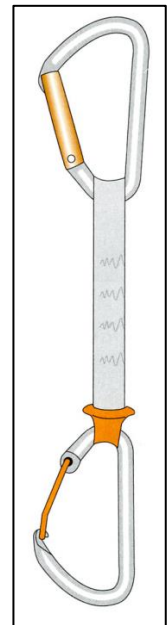


Abb. 4:
Expressschlinge

1.3.4 Klemmgeräte

Nicht überall sind die Kletterrouten mit fixen Bohrhaken ausgerüstet. Vielerorts muss man auch selbst Sicherungen legen. Wenn eine ganze Route mit eigenen Sicherungen geklettert wird, nennt man dies Clean-Climbing. Teilweise werden auch nur unzureichende oder mangelhafte Bohrhaken durch eigene Zwischensicherungen ergänzt. Dazu werden meist Klemmgeräte wie Keile oder sogenannte Friends verwendet.

⁸ Karabiner: Winkler, 2014

⁹ Bergsport Sommer: Winkler et al, 2006

Keile

Klemmkeile bestehen aus einem keilförmigen Alublock und einem Stahldraht. Sie haben eine feste unveränderliche Form und sind sogenannte passive Klemmgeräte. Sie können in schmale Risse geklemmt und dann als Zwischensicherung oder für das Einrichten eines Standplatzes genutzt werden. Sie sind geeignet für in sich nach vorne oder nach unten verengende Risse. Das richtige Einsetzen von Keilen erfordert viel Übung und Fingerspitzengefühl. Es muss darauf geachtet werden, dass die richtige Grösse verwendet wird, dass der Keil in die richtige Richtung belastet wird und dass er auf beiden Seiten möglichst vollständig auf dem Fels aufliegt.

Wenn ein Keil gut verankert ist, kann er meist nur noch schwer aus dem Riss entfernt werden. Mit sogenannten „Grüblern“ wird das Herauslösen jedoch vereinfacht.¹⁰

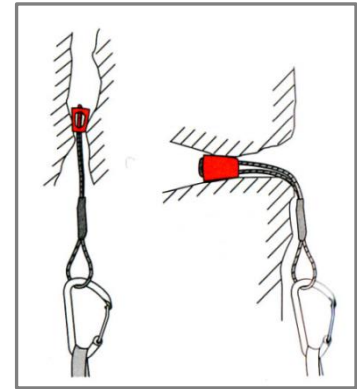


Abb. 5: Verankerung eines Keils

Friends

Friends sind aktive Klemmgeräte. Sie können auch in sich nicht verengenden Rissen platziert werden. Sie sind so konstruiert, dass sie mithilfe eines Hebels zusammengezogen und dann in kompakter Form in einen Riss geschoben werden können. Dort wird der Hebel wieder losgelassen und die Segmente des Friends drücken nun gegen den Fels. Der Friend ist festgeklemmt. Die erzeugte Haftreibung ist stark genug, um einen Sturz aufzufangen.

Auch Friends gibt es in verschiedenen Grössen. Es gibt sehr unterschiedliche Modelle, jedoch ist die Form der Segmente immer die gleiche charakteristische logarithmische Spirale.¹¹

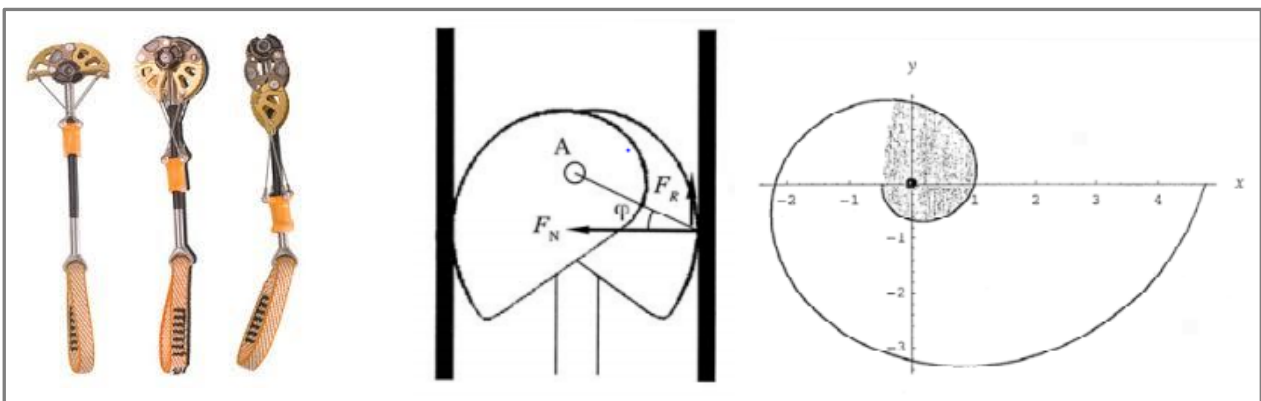


Abb. 6: Aufbau und Form der Friends

1.3.5 Schlingen

Auch Schlingen sind nützlich um eigene Sicherungen zu legen. Sie können beispielsweise um Felszacken oder Bäume gelegt werden oder durch sogenannte Sanduhren gefädelt werden. Zudem werden Schlingen zur Standplatzeinrichtung und zur Selbstsicherung verwendet.

¹⁰ Keile: <http://www.alpin.de>

¹¹ Friends: <http://de.wikipedia.org>

Bandschlingen

Wie der Name sagt, bestehen Bandschlingen aus einem Band, das zu einer geschlossenen Schlinge vernäht ist. Es sind auch offene Schlingen erhältlich, die dann mit einem Bandschlingenknoten verbunden werden können. Jedoch darf diese Verknötung nicht bei allen Bandschlingenmaterialien vorgenommen werden, da sich der Knoten lösen könnte. Zudem lässt die Festigkeit der Schlinge bei einer Verknötung nach.

Bandschlingen sind vielseitig einsetzbar. Sie werden als Zwischensicherung und am Standplatz gebraucht. Eine spezielle Form ist die Selbstsicherungsschlinge, die nötig ist, um sich selbst am Standplatz abzusichern. Sie ist in drei oder mehr Schlingen unterteilt. Beim Abseilen kann das Abseilgerät in die mittlere der Schlingen eingehängt werden. Es gibt sehr unterschiedliche Modelle. Oft wird auch eine normale Bandschlinge durch Knoten unterteilt.¹²

Reepschnüre

Wie auch Bergseile, sind Reepschnüre aus einem Kern und einem Mantel aufgebaut. Jedoch sind sie dünner und weniger elastisch. Deshalb dürfen sie nur für statische Belastungen eingesetzt werden. Reepschnüre werden normalerweise in offener Form gekauft und je nach Gebrauch zu einer Schlinge verknötet. Übliche Knoten sind der Achter und der doppelte Spierenstich. Reepschnüre werden oft als Zwischensicherungen genutzt und sind als Prusikschnuren beim Abseilen und Selbstaufstieg im Einsatz.¹³

Materialien & Knotenfestigkeit¹⁴

Bandschlingen und Reepschnüre können aus verschiedenen Fasern oder aus Fasermischungen aufgebaut sein.




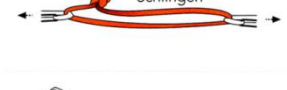



Die drei Grundmaterialien sind Nylon, Dyneema und Kevlar, wobei dies alles nur Markennamen sind.

Nylon-Bandschlingen sind am häufigsten vertreten. Sie bestehen, wie auch die Bergseile, aus Polyamid.

Dyneema-Bandschlingen sind dank ihrer hohen Zugfestigkeit dünner und somit äusserst praktisch handzuhaben. Sie werden aus Polyethylen hergestellt und haben eine extrem glatte Oberfläche. Sie sind nur als vernähte Bandschlingen erhältlich, weil sich Knoten zu leicht lösen können.

Durch Knotung nimmt die Festigkeit einer Bandschlinge stark ab. Wenn immer möglich sollte sie als knotenfreier Ring verwendet werden.

Knoten, durch die kein Karabiner führt, sind nur für Polyamidschlingen geeignet, da die anderen Materialien zu rutschig sind.

Knotenfestigkeit vernähter Bandschlingen		
	ungefähre Festigkeit (% im Vergleich zum knotenfreien Ring)	Beschreibung
	100%	Schlinge als Ring. Norm: 22 kN (ca. 2'200 kg)
	25%	«Anseilbelastung» auf Einzelstrang
	50%	Polyamid
	40%	Mischgewebe, Achterknoten
	-- (Knoten kriecht)	Mischgewebe, Führerknoten
	-- (Knoten kriecht)	Polyäthylen
	60%	Ankerstich

Werte bei statischer Belastung gemessen [DAV-Sicherheitskreis, 2005].

Abb. 7: Knotenfestigkeit vernähter Bandschlingen

¹² Bergsport Sommer: Winkler et al, 2006

(S.74-75)





¹³ Bergsport Sommer: Winkler et al, 2006
Tendon

(S.73)

¹⁴ Schlingen: Semmel, 2014

Auch Reepschnüre bestehen meist vollständig aus Polyamid. Es gibt jedoch auch Reepschnüre, bei denen nur der Mantel aus Nylon ist und der Kern aus Kevlar oder Dyneema besteht.

Durch einen Anseilknoten gehen 50 % der Festigkeit verloren, als geknüpfte Schlinge können jedoch 100 % gewährleistet werden. Mithilfe einer doppelten Schlinge kann die Festigkeit sogar verdoppelt werden.

Knotenfestigkeit von Seilen und Reepschnüren		
ungefähre Festigkeit (% vom einfachen Strang)	Beschreibung	
100%	einfacher Strang gemäss Norm: 5 mm: 5,0 kN 6 mm: 7,2 kN 8 mm: 12,8 kN	
50%	«Anseilbelastung»	
100%	geknüpfte Schlinge	
200%	geknüpfte Schlinge, doppelt	

⇒ Die Knotenfestigkeit des Führerknotens ist besonders klein → besser Achterknoten verwenden.

Abb. 8: Knotenfestigkeit von Seilen und Reepschnüren

Kevlar besteht aus Aramidfasern (Aramide werden auch aromatische Polyamide genannt) und hat eine sehr hohe Zugfestigkeit.

Von den drei Materialien hat Dyneema deutlich den tiefsten Schmelzpunkt. Dieser Umstand und die rutschige Oberfläche machen das High-Tech-Material sehr umstritten. Sorgen sind aber unberechtigt, solange die Schlingen richtig eingesetzt werden. Es sollten keine Schlingen mittels eines Knotens geschlossen werden, aber sogenannte „Augenknoten“ stellen keine Gefahr dar.

In einem Test zur Scharfkantenfestigkeit wurde klar, dass Nylon weitaus die geringste Kantenstabilität aufweist. Kevlar hat etwa die dreifache Kantenstabilität und Dyneema hält bei gleichem Querschnitt das Sechsbis Siebenfache.

Somit haben alle Materialien ihre Vorteile und mit ein wenig Grundwissen können sie optimal eingesetzt werden.

	Zugfestigkeit N/mm Ø	Elastizität Bruchdehnung %	Schmelzpunkt °C	Dichte/Gewicht g/mm ³	Schnittfestigkeit	UV-Beständigkeit
Dyneema [Polyethylen [PE]]	ca. 3400	ca. 2,7–3,5	ca. 130	1,14	hoch	mittel
Nylon [Polyamid [PA]]	ca. 900	ca. 37	ca. 255	0,97	gering	mittel
Kevlar [Aramid [Ar]]	ca. 3000	ca. 2–4	ca. 550 [Zersetzung]	1,45	mittel	gut

Abb. 9: Vergleich Schlingenmaterialien

1.3.6 Sicherungs- und Abseilgeräte

Es gibt unterschiedlichste Sicherungsgeräte. Einige funktionieren halbautomatisch, sie verfügen über ein automatisches Blockiersystem. Bei anderen wird noch vollständig manuell blockiert. Einige Sicherungsgeräte können auch als Abseilbremse genutzt werden. Eine Gemeinsamkeit aller Sicherungsgeräte ist, dass das Bremsseil nie losgelassen werden darf und

dass das Sichern mit dem entsprechenden Gerät zuerst erlernt werden muss. Jedes Sicherungsgerät ist nur so verlässlich, wie es die Fähigkeiten des Sichernden zulassen. Die bekanntesten Sicherungsgeräte sind HMS, Tuber, Grigri, Magic Plate und Achter.¹⁵

HMS

HMS ist die Abkürzung für Halbmastwurfsicherung und somit eigentlich kein Sicherungsgerät. Zur Halbmastwurfsicherung benötigt man einen HMS-Schraubkarabiner und den Halbmastwurf. Dieser Sicherungsknoten hat eine relativ grosse Bremswirkung und ist deshalb auch für das Abfangen von harten Stürzen geeignet. Die HMS gilt als ungeeignete Abseilbremse und sollte nur notfalls zum Abseilen verwendet werden.¹⁶

Tuber

Es gibt sehr viele verschiedene Tuber von unterschiedlichen Herstellern. Die zwei bekanntesten Ausführungen sind das ATC (**A**ir **T**raffic **C**ontroller) und der Reverso.

Tuber sind gute Abseilbremsen und ausserdem geeignet um mit Halbseilen zu sichern, da beide Halbseilstränge parallel bedient werden können. Ein weiterer Vorteil ist, dass bei vielen Modellen zwei Nachsteiger am Halbseil bequem einzeln nachgesichert werden können. Ein Nachteil des Tubers ist seine geringe Bremskraft. Stürze mit einem hohen Sturzfaktor sind nur schwer zu halten.¹⁷

Grigri

Das Grigri ist ein sogenannter Halbautomat. Bei einer ruckartigen Belastung des Seils blockiert es automatisch. Das System funktioniert somit ähnlich wie ein Autogurt. Der Sichernde muss also nur Seil einziehen und Ausgeben. Zum Seilausgeben wird ein Hebel gezogen, wodurch die Blockierung gelöst wird.

Ein Grigri ist ein relativ bequemes Sicherungsgerät, da ein Sturz ohne grossen Kraftaufwand gehalten werden kann. Es gilt bei korrekter Anwendung als sehr sicher. Die automatische Blockierung bietet einen zusätzlichen Schutz, wenn die sichernde Person beispielsweise bewusstlos ist. Trotzdem darf das Bremsseil nicht losgelassen werden. Die Blockierautomatik ist auch nicht vollkommen sicher, weil sie nur bei einem Ruck funktioniert. Bei starkem Seilzug oder wenn sich der Kletterer in das Seil setzt kann dieser Ruck ausbleiben.

Das Gerät kann nur für Einfachseile ab einem bestimmten Durchmesser eingesetzt werden. Sonst ist die Bremswirkung nicht garantiert. Ein weiterer Nachteil ist, dass das Grigri nur ganz oder gar nicht blockiert. Dynamisches Sichern wird durch diesen Aspekt erschwert.

Auf den ersten Blick erscheint das Grigri vielen als einfach zu bedienendes, für Anfänger geeignetes Sicherungsgerät, weil es selbstständig blockiert. Dem ist jedoch nicht so, im Gegenteil: Es kommt immer wieder zu Unfällen wegen falscher Verwendung des Grigris.

Ein grosses Problem ist, dass bei einem Sturz oft reflexartig am Hebel gezogen wird, wodurch die Blockierautomatik aufgehoben und der Sturz nicht mehr abgebremst wird.

Das Grigri ist deshalb kein Anfängersicherungsgerät.¹⁸

¹⁵ Bergsport Sommer: Winkler et al, 2006 (S. 156, 163)

¹⁶ Bergsport Sommer: Winkler et al, 2006 (S. 156, 163)

¹⁷ Bergsport Sommer: Winkler et al, 2006 (S. 157, 163)

¹⁸ Bergsport Sommer: Winkler et al, 2006 (S. 157, 163)

Grigri: <http://de.wikipedia.org>

Magic Plate

Das Magic Plate ist ein Vorgänger des Tubers und ebenfalls ein selbstblockierendes Sicherungsgerät zur Nachsicherung. Es kann bei dicken Seilen auch zum Abseilen genutzt werden. Bei dünnen Seilen ist die Bremswirkung zu gering. Wie auch beim Tuber verlaufen die Seilstränge bei der Sicherung von zwei Nachsteigern einzeln und die Stränge können somit unabhängig voneinander bedient werden.

Das Magic Plate ist immer seltener anzutreffen, es wird nach und nach von Tubern und anderen vielseitigeren Geräten verdrängt.¹⁹

Achter

Der (Abseil-)Achter ist eigentlich als Abseilgerät gedacht. Er wird jedoch auch oft als Sicherungsgerät eingesetzt. Die Reibung ist bei der Achtersicherung teilweise sehr gering und somit sind harte Stürze schwer zu halten. Besonders gering ist die Reibung bei neuen Seilen. Es ist empfehlenswert, den Abseilachter nur als Abseilbremse und nicht als Sicherungsgerät zu verwenden.²⁰

Alle Sicherungsgeräte haben ihre Vor- und Nachteile. Es ist wichtig, dass einem das eigene Sicherungsgerät vertraut ist und man weiss, wie man es verwendet.

1.3.7 Helm

Der Kletterhelm ist ein sehr wichtiger Teil der Ausrüstung eines Alpinisten. Er schützt vor Kopfverletzungen bei einem Sturz und gegen Steinschlag.

Es gibt Hartschalenhelme und etwas leichtere geschäumten Helme. Die geschäumten Helme schützen besser vor Sturzverletzungen, dafür sind die Hartschalenhelme als Schutz vor Steinschlag überlegen.

Beim Klettern am Fels und auf Hochtouren im felsigen Gelände sollte immer ein Helm getragen werden. Dies gilt nicht nur für unerfahrene Kletterer, denn ein Kletterprofi ist ebenso von Steinschlag bedroht wie ein Anfänger.²¹

1.4 Abgenutztes Material

Sicherungsmaterial wird mit jedem Gebrauch mehr abgenutzt und muss irgendwann ersetzt werden. Gebrauchsspuren oder Verletzungen des Sicherungsmaterials sind fast immer von bloßem Auge zu erkennen und somit kann das Material einfach beurteilt werden. Typische Gebrauchsspuren sind eingeschliffene Stellen an Karabinern oder Aufrauungen am textilen Sicherungsmaterial.

Am stärksten werden Expresskarabiner, Seile und HMS-Karabiner beansprucht, weil sie auch ohne einen Sturz abgenutzt werden.

¹⁹ Bergsport Sommer: Winkler et al, 2006 (S. 157, 163)

²⁰ Bergsport Sommer: Winkler et al, 2006 (S. 163)
Achter: <http://www.outdoorseiten.net>

²¹ Bergsport Sommer: Winkler et al, 2006 (S. 70)

1.4.1 Seilverschleiss²²

Es ist nicht möglich, eine bestimmte Lebensdauer für ein Bergseil festzulegen. Diese hängt davon ab, wie oft das Seil gebraucht wird und welchen äusseren Einwirkungen es ausgesetzt wird.

Es gibt unterschiedliche Faktoren, die die Lebensdauer verkürzen:

Der *Abrieb* ist eine unvermeidliche Abnutzung des Bergseils. Er entsteht durch Reibung zwischen dem Seil und Fels oder Karabinern. Besonders gross ist der Abrieb, wenn das Seil über eine scharfe Kante läuft oder beim Toprope-Klettern und Abseilen. Durch die Reibung reissen einzelne Mantelfasern. Man erkennt die Abnutzung des Seils an der Aufrauung der Oberfläche.

Auch andere *mechanische Einwirkungen* durch Pickel, Steigeisen oder ähnliches können den Seilmantel und danach auch die Kernfasern verletzen.

Der *Sturzbelastung* bei normalen Sportkletterstürzen kann ein Seil problemlos standhalten ohne langfristige Beschädigungen davonzutragen. Bei intensivem Gebrauch des Seils und bei Stürzen mit einem Sturfaktor über 1 können jedoch die Sicherheitsreserven des Seils vermindert werden, da sie teilweise über ihre Elastizitätsgrenze gedehnt und somit plastisch verformt werden.

Bei falschem Seilverlauf kann es sein, dass Seil auf Seil reibt. Es kann zur *Schmelzverbrennung* kommen. Auch beim Sichern harter Stürze und bei schnellem Abseilen kann die entstehende Reibung zur Schmelzverbrennung führen.

Schmelzspuren sehen meist dunkel und verschmort aus. Sie machen das Seil an der entsprechenden Stelle steif und unhandlich. Zudem verschlechtern sie die Festigkeit des Seils, weil es durch die Verschmelzung der Fasern unelastisch wird.

Wenn ein Seil mit einer Säure oder anderen aggressiven Stoffen in Kontakt kommt, kann es *chemisch* beschädigt werden. Die Art der Beschädigung kann von Substanz zu Substanz unterschiedlich sein. Es können Seilverdünnungen und Aufweichungen auftreten. Organische Säuren können die Seilfasern angreifen und sie zersetzen. Durch solche Beschädigungen wird die Zugfestigkeit des Seils vermindert. Verfärbungen des Mantels können auf eine chemische Beschädigung hinweisen, jedoch sind nicht alle Beschädigungen von aussen sichtbar.

Verschmutzungen machen das Seil unhandlich, erschweren das Sichern und stellen somit eine Gefahr dar. Eine besondere Gefahr stellen Verschmutzungen durch Quarzkristalle aus Sand oder Granitstaub dar. Sie können in den Kern eindringen und die Festigkeit des Seils reduzieren. Solche inneren Schädigungen kann man an unregelmässiger Dichte und weichen Stellen erkennen.

Auch *UV-Strahlung* kann dem Seil schaden, jedoch vermindert sie die Seilfestigkeit nur unwesentlich. Die Farben des Seilmantels werden nach und nach ausgebleicht.

Spiralförmige Verdrehungen des Seils nennt man *Krangel*. Sie entstehen vor allem beim Sichern. Durch starke Krangel wird das Seil-Handling erschwert.

Feuchtigkeit kann die Festigkeit des Seils vorübergehend verschlechtern und ausserdem ist ein nasses oder gar gefrorenes Seil mühsam zu bedienen. Nach dem Trocknen sollte das Seil wieder die volle Leistung bringen können.

Um beurteilen zu können, ob ein Kletterseil noch intakt ist, sollte es regelmässig kontrolliert werden. Dazu wird es Stück für Stück durch die Hand gezogen und nach Unregelmässigkeiten

²² Tendon

Seilfibel: <http://www.mammut.ch>

abgetastet. Bei offenen Stellen und grösseren Unregelmässigkeiten muss das Seil aussortiert werden.

*Seilfasern unterm Mikroskop*²³

Ich durfte im REM-Labor des Zentrums für Mikroskopie der Universität Basel (ZMB) unter dem Licht- und Rasterelektronenmikroskop Aufnahmen von intakten und gerissenen Seilfasern machen.

Die Seilfasern habe ich aus Seilreststücken entnommen, die mir von der Mammut Sports Group AG zur Verfügung gestellt worden sind.

Die vorbereiteten Fasern habe ich zugeschnitten und mit doppelseitigen Kohleklebern (Leit-C Tabs) gespannt auf Aluminiumprobentellern befestigt. Vor dem Mikroskopieren musste das Präparat durch eine Goldbeschichtung in einem Hochvakuum Sputtergerät elektrisch leitfähig gemacht werden. Die aufgetragene Goldschicht war 30 nm dick.

Danach konnten die Aufnahmen gemacht werden. Im Rasterelektronenmikroskop wurde bei Raumtemperatur ein Hochvakuum angelegt. Die Anregungsspannung des Elektronenstrahls betrug 5 kV.

Die anderen Aufnahmen wurden unter einer Stereolupe mit integrierter Kamera gemacht.

Unbelastete Seilfasern:

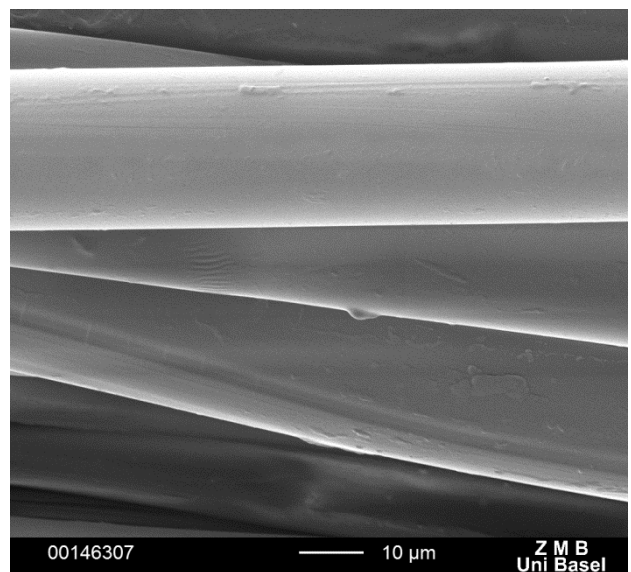
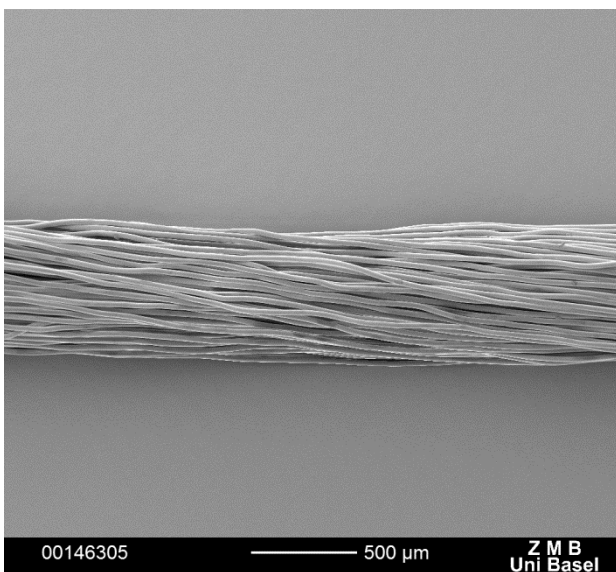
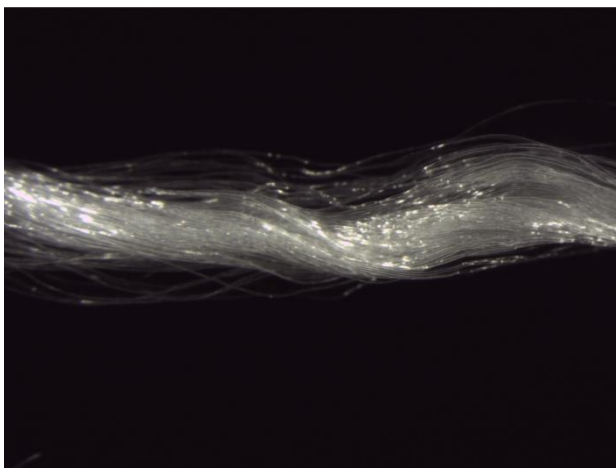


Abb. 10: Licht- und rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen von unbelasteten Seilfasern

Die regelmässige Oberfläche der Fasern zeigt, dass sie wirklich intakt sind. Die Fasern stammen aus der neuen Mammut Dry Kollektion, bei der auch die Kernfasern imprägniert wurden. Die Imprägnierung trägt wahrscheinlich auch zum glatten Aussehen bei.

Gedehnte Seilfasern:

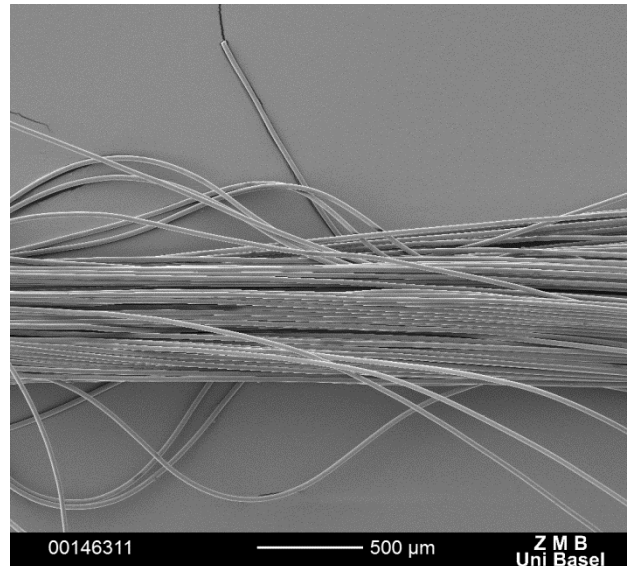
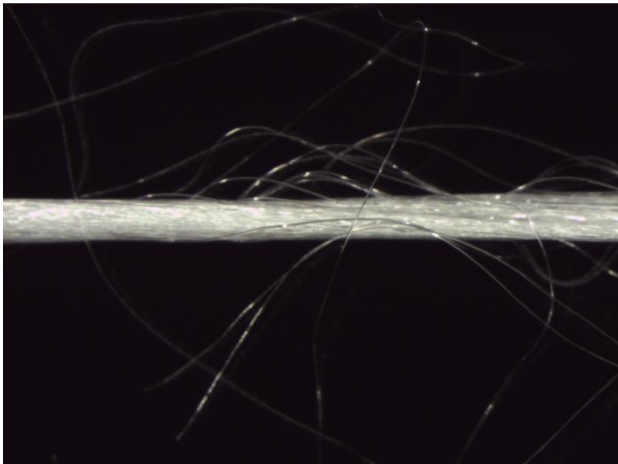


Abb. 11: Gedehnter Faserstrang: einige Fasern sind schon gerissen

Die vorbelasteten Fasern wurden anscheinend über ihre Elastizitätsgrenze hinaus gedehnt. Sie wurden plastisch und somit irreversibel verformt. Einige Fasern sind schon gerissen. Obwohl die Fasern gedehnt sind, scheint ihre Oberfläche immer noch unbeschädigt zu sein.

Wenn der Strang reisst, zieht er sich zu einem Gewirr zusammen. An den Faserenden tritt eine Art Schmelzverbrennung auf, deshalb bilden sich unterschiedlichste Strukturen. Ein Teil der beim Reissen der Faser freigesetzten Energie wird in Wärme umgewandelt. Dadurch sind die Schmelzverbrennungen erklärbar.

Gerissene Seilfasern:

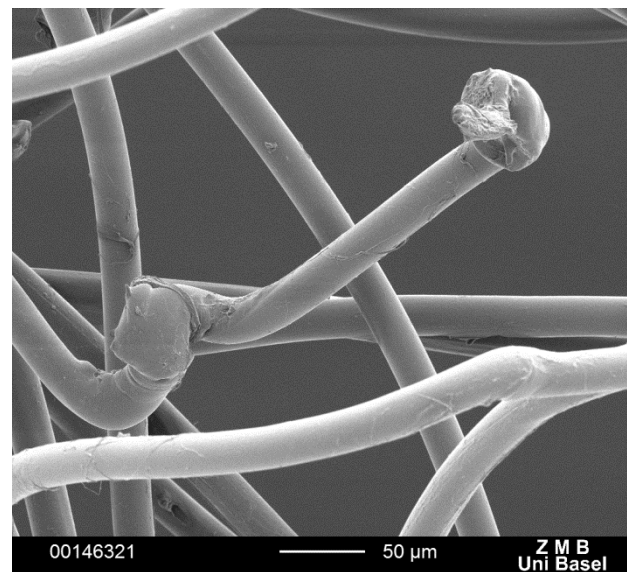
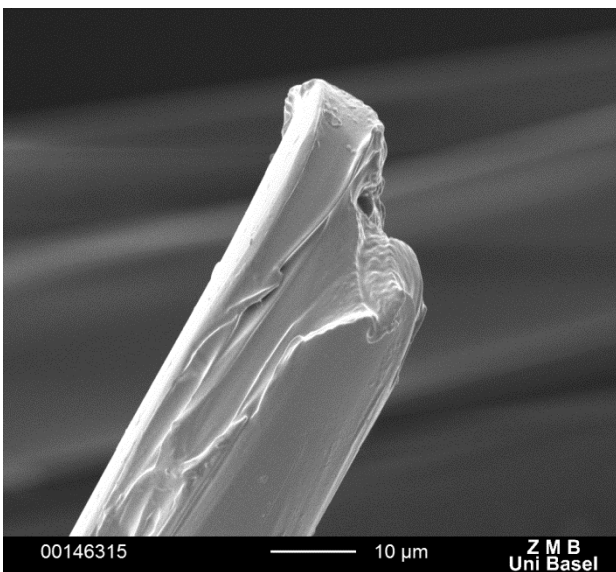
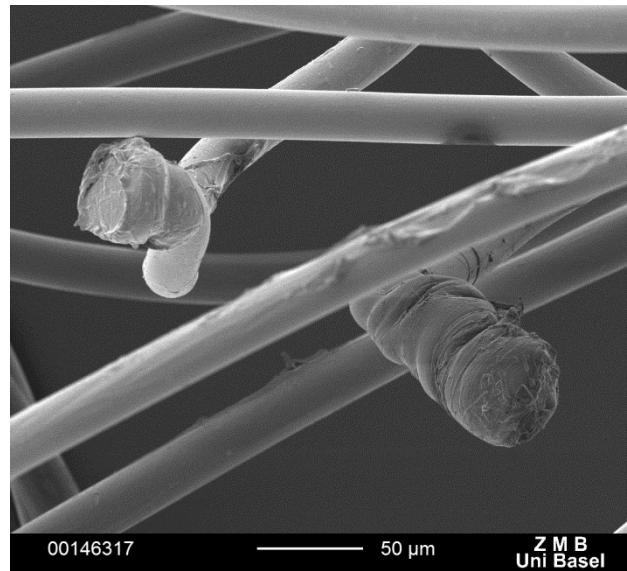
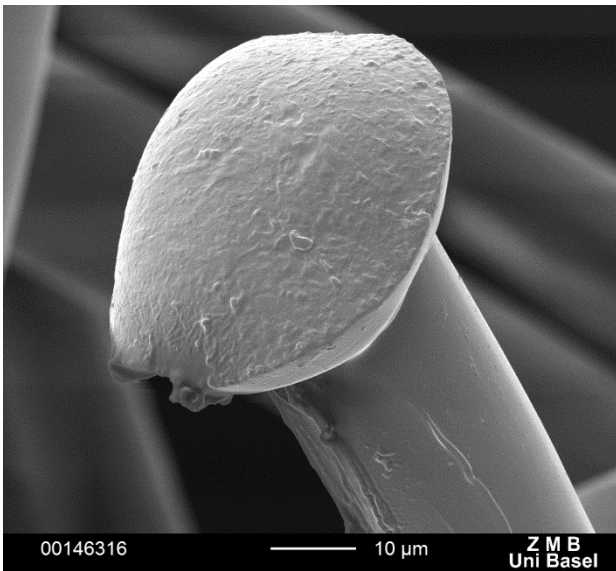
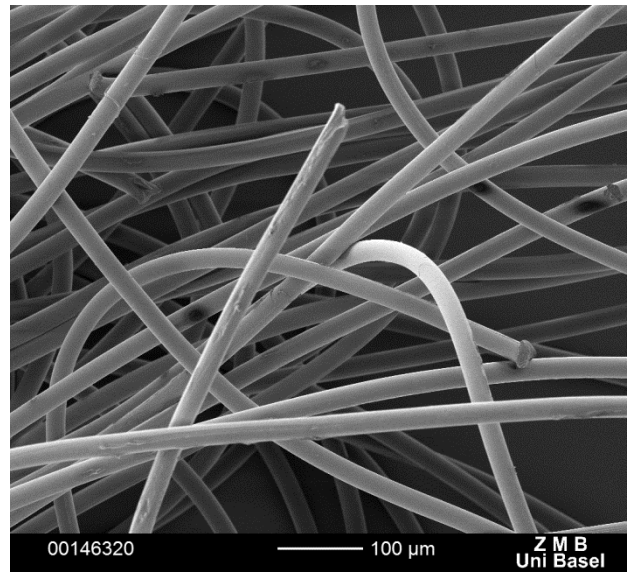
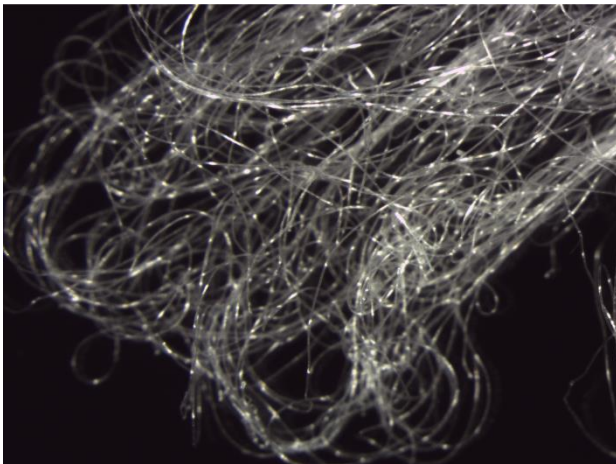


Abb. 12: Gerissener Strang, verschiedene Strukturen an den einzelne Faserenden

1.4.2 Eingeschliffene Expressen ²⁴

Wie auch Umlenkkarabiner werden Expressen durch die Reibung immer mehr eingeschliffen. Dies kann vor allem in Klettergartenrouten mit fixen Expressschlingen fatale Folgen haben. Wenn ein Kletterer über einen Umlenkkarabiner abgeseilt wird, wird das Seil um 180° umgelenkt und die beiden Stränge verlaufen somit parallel. Das Seil hinterlässt eine abgerundete Kerbe ohne scharfe Kante.

Im Gegensatz dazu können bei fixen Zwischensicherungen am seilseitigen Karabiner scharfe Einkerbungen entstehen. Das Seil wird immer im gleichen Winkel durch den Karabiner gezogen und deshalb werden die Kerben auch nicht abgerundet. Wegen der starken Umleitung des Seils in der ersten Expressschlinge wird der erste Expresskarabiner besonders schnell abgenutzt. Eingeschliffene Expressen bedeuten Lebensgefahr für das Kletterseil und somit für den Kletterer.

Beim Klettern einer Route, die mit fixen Zwischensicherungen abgesichert ist, sollte jede Expressschlinge kritisch beurteilt werden und gegebenenfalls durch eigenes Material ersetzt werden.

Zudem sollte auf einen möglichst reibungsarmen Seilverlauf geachtet werden, um die Abnutzung gering zu halten.

Fixe Expressen sind vor allem in überhängenden und somit sturzfrendlichen Routen zu finden. Falls das eigene Material nicht ausreicht, um alternative Zwischensicherungen einzurichten, ist es somit besser, eine fragwürdige Zwischensicherung auszulassen und ein paar Meter weiter ins Seil zu stürzen, als einen Express zu verwenden, der das Seil bei einem Sturz durchschneiden würde. Wenn es zu riskant ist, eine Zwischensicherung auszulassen, sollte die Route abgebrochen werden.

Es ist wichtig, dass fixe Zwischensicherungen nur dort verwendet werden, wo es auch Sinn macht. Zudem müssen sie unbedingt regelmässig gewartet werden, damit es keine Unfälle gibt, die vermieden werden können.

²⁴ Expressen: Hasler, 2012

1.5 Formeln und Herleitungen

1.5.1 Statische Belastung

Bei einer statischen Belastung wie am Standplatz wirkt nur die Gewichtskraft F_G auf das Seil.

Sie wird mit der Formel $F_G = m * g$ berechnet.

1.5.2 Sturzfaktor

Der Sturzfaktor ist ein wichtiger Faktor für das Ausmass eines Sturzes. Er ist der Quotient aus der Sturzhöhe und der Länge des ausgegebenen Seils.

$$f = \frac{\text{Sturzhöhe}}{\text{ausgegebenes Seil}}$$

1.5.3 Seildehnung

Die bei einem Sturz auftretende Seildehnung Δl ist abhängig von der Kraft, die durch den Sturz auf das Seil wirkt, und von der Federkonstante des Seils. Die Federkonstante ist wiederum abhängig vom Elastizitätsmodul des Seilmaterials und von der betroffenen Seillänge.

Der Elastizitätsmodul ist eine Materialkonstante zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Spannung und Dehnung bei der linear-elastischen Verformung eines festen Körpers.

$$F = D * \Delta l \quad \text{Hookesches Federgesetz}$$

$$D = \frac{E * q}{L}$$

D= Federkonstante

E= Elastizitätsmodul

q= Seilquerschnittsfläche

L= ausgegebenes Seil

Es gilt das Gesetz der Energieerhaltung: Die Energie ist vor, während und nach dem Sturz immer gleich.

$$E_{kin} = E_{pot} = E_{el} = \frac{m}{2} * v^2 = m * g * (h + \Delta l) = \frac{1}{2} * D * \Delta l^2$$

$$0 = \frac{1}{2} * D * \Delta l^2 - m * g * \Delta l - m * g * h$$

$$\Delta l = \frac{m * g \pm \sqrt{m^2 * g^2 + 2 * D * m * g * h}}{D}$$

Nach dem Auflösen der Gleichung nach Δs mithilfe der Mitternachtsformel steht ein \pm in der Gleichung. Das Minus kann jedoch ausgeschlossen werden, da die Seildehnung bei einem Sturz grösser sein muss als bei einer statischen Belastung.

$$\Delta l = L * \frac{m * g + \sqrt{m^2 * g^2 + 2 * \frac{E * q}{L} * m * g * h}}{E * q}$$

h= Sturzhöhe

Δl =Seildehnung

1.5.4 Fangstoss

$$F = D * \Delta l = m * g + \sqrt{m^2 * g^2 + 2 * D * m * g * h}$$

$$= m * g + \sqrt{m^2 * g^2 + 2 * \frac{E * q}{L} * m * g * h}$$

$$F = D * \Delta l = m * g + \sqrt{m^2 * g^2 + 2 * m * g * E * q * \underbrace{\frac{h}{L}}_{=f}}$$

=> Der Fangstoss ist abhängig von der Masse des Sturzobjekts, dem Sturfaktor, dem Seildurchmesser und dem Elastizitätsmodul.

Der Elastizitätsmodul und somit auch die Fangstossformel sind nur gültig, solange das Seil nicht plastisch verformt wird. Die Formel gilt also nur für den ersten Teil des Spannungs-Dehnungs-Diagramms.

1.5.5 Spannungs-Dehnungs-Diagramm

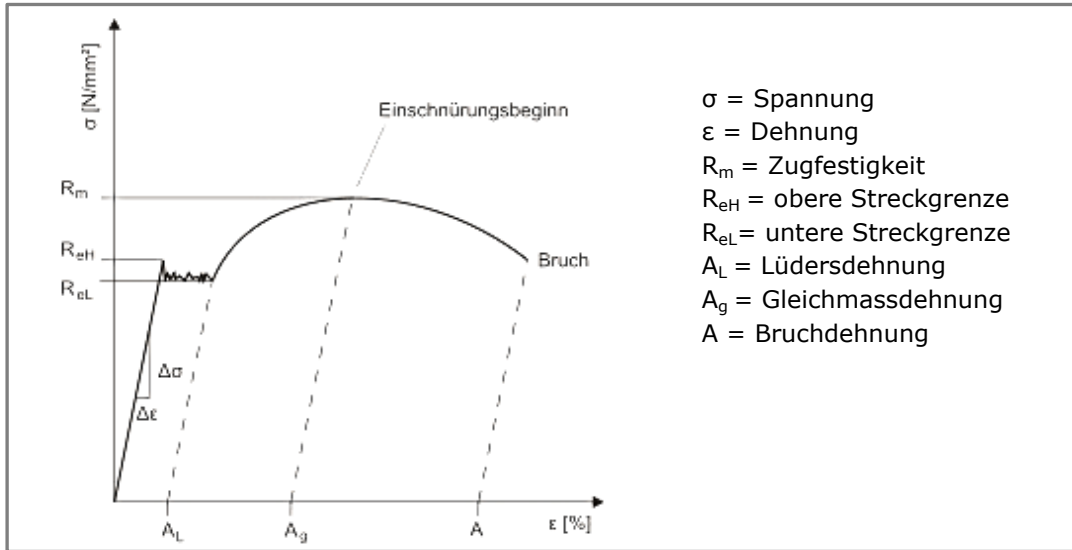


Abb. 13: Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Die Spannung gibt an, welche Kraft auf eine bestimmte Querschnittsfläche wirkt.

Ein Seil wird bei einer Belastung auf Zug anfangs proportional zur Spannung gedehnt. In diesem linear-elastischen Bereich ist das Hookesche Gesetz gültig und der Graph verläuft als „Hookesche Gerade“. Das Seil wird nur elastisch verformt und kann daher nach der Belastung wieder in den Ausgangszustand zurückkehren.

Danach beginnt der nicht-linear-elastische Bereich. Die Verformung ist zwar noch reversibel, jedoch nicht mehr proportional zur Spannung. Die Streckgrenze ist die Grenze zwischen elastischer und plastischer Verformung. Man unterscheidet zwischen der oberen und der unteren Streckgrenze:

Wenn die obere Streckgrenze überschritten wird und die Spannung noch weiter erhöht wird, wird das Seil plastisch verformt. Wenn die obere Streckgrenze erreicht wird, ist das Seil so stark belastet, dass es auch ohne weitere Belastung oder sogar bei geringerer Belastung noch mehr gedehnt wird. Die Streckgrenze wird also herabgesetzt.

Die untere Streckgrenze bezeichnet die kleinste Spannung, bei der plastische Verformung eintritt.

Den Bereich zwischen der unteren und der oberen Streckgrenze nennt man Lüdersdehnung. In diesem Bereich verläuft der Graph sehr unregelmässig.

Den Rest des Spannungs-Dehnungs-Diagramms bezeichnet man als plastischen Bereich. Die Spannung ist so gross, dass teilweise irreversible Verformungen auftreten, was bedeutet, dass das Seil nach dem Spannungsabfall nicht wieder in die Ursprungslage zurückkehren kann.

Wenn die Zugfestigkeit erreicht ist, kommt es zur Einschnürung und das Seil reisst. Es kommt zum sogenannten Bruch.²⁵

²⁵ Spannungsdehnungsdiagramm: <http://de.wikipedia.org>
Bruchdehnung: <http://www.kummetat.de>
Streckgrenze: <http://www.kummetat.de>
Zugfestigkeit: <http://www.kummetat.de>
Zugversuch: <http://de.wikipedia.org>

1.5.6 Zugfestigkeit

Die Zugfestigkeit R_m ist ein Kennwert, der angibt, bei welcher Spannung ein Material reißt. Sie ist somit ein Maß dafür, wieviel ein Seil aushält.

Die Spannung ist der Quotient zwischen der wirkenden Kraft und der belasteten Querschnittsfläche:

$$\sigma = \frac{F}{q}$$

Das Seil reißt, wenn die Spannung die Zugfestigkeit überschreitet, also wenn gilt:

$$\sigma = \frac{F}{q} > R_m$$

Bei einem Sturz entspricht die Kraft F theoretisch dem Fangstoss.

$$\sigma = \frac{m * g + \sqrt{m^2 * g^2 + 2 * m * g * E * q * \frac{h}{L}}}{q} > R_m$$

Jedoch darf nur bei einer linear elastischen Verformung mit dem E-Modul gerechnet werden und deshalb kann diese Formel nicht als absolut richtig, sondern nur als Annäherung angesehen werden!

Ein intaktes Bergseil hält mehr, als der maximal auftretende Fangstoss beträgt. Es kann also theoretisch nicht reißen. Wenn das Seil jedoch über eine Kante oder durch eine Umlenkung läuft, entsteht Reibung und es kann somit trotzdem reißen. ²⁶

²⁶ Bergsport Sommer: Winkler et al, 2006

2. Besuch des Testlabors der Mammut Sports Group AG²⁷

Ich durfte im Oktober das Testlabor der Mammut Sports Group AG besichtigen. Ich wurde von Katalin Dozsa von der Rope Development Abteilung über die Testmethoden und Normen informiert und durfte auch einen Blick auf die Seilproduktion werfen.

2.1 Der Seiltest

Bei jeder Produktionscharge werden 6000-24000 m Seil produziert. Davon werden circa 20 m im Testlabor getestet. Zudem wird die ganze Charge bei der Produktion mit Sensoren abgetastet. Es wird physisch und mit Laser nach Fehlern abgesucht. Auch in der Qualitätssicherung wird das Seil nochmals maschinell abgetastet und sogar der Zuschneider verfügt über Testsensoren. So kann gewährleistet werden, dass die gesamte Produktionscharge die Sicherheitsbestimmungen erfüllt.

2.2 Getestet wird:

- Abzug
- Seildurchmesser
- Metergewicht
- Sturzzahl
- Fangstoss
- Gebrauchsdehnung
- Dehnung im ersten Sturz
- Kernmantelverschiebung
- Knotbarkeit
- Wasseraufnahme

2.2.1 Abzug

Das Muster eines Seiles wiederholt sich periodisch. Bei der Abzugskontrolle wird überprüft, ob die Periodenlänge konstant ist. So kann festgestellt werden, ob das Seil regelmässig geknüpft ist. Der Abzug wird mit einfachen Mitteln direkt abgemessen. Fehlerhafte Seilstücke werden aussortiert.

2.2.2 Seildurchmesser

Der Seildurchmesser wird unter einer Belastung von 10 kg gemessen. Es werden jeweils zwei im rechten Winkel zueinander

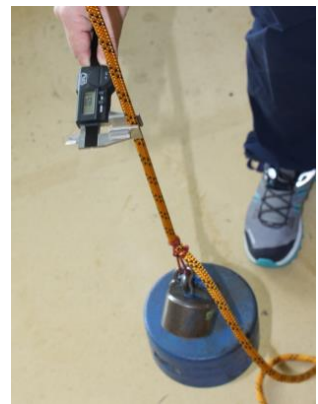


Abb. 14: Messung des Seildurchmessers

²⁷ Testlabor
Prüfprotokolle
Dealer-Workbook
Seilfibel:

(S.28-34)
<http://www.mammut.ch>

stehende Durchmesser gemessen. Je ähnlicher die beiden sind, desto runder ist das Seil.

2.2.3 Metergewicht

Das Metergewicht ist in der Praxis vor allem eine Komfortfrage. Für die Seilherstellung ist die Messung des Metergewichts aber auch eine Möglichkeit zur Überprüfung der Seillänge. Die Einlage (Kern) und der Mantel werden auch noch separat gewogen. So kann der Mantelanteil des Seils bestimmt werden.

2.2.4 Sturzzahl

Die Sturzprüfung steht beim Seiltest im Vordergrund. Es wird die Anzahl der Normstürze getestet, die ein Seil aushält. Normstürze haben einen Sturfaktor von mindestens 1.75.

Einfachseile werden mit einem Sturzwergicht von 80 kg getestet und müssen mindestens 5 Normstürzen standhalten bevor sie reißen.

Ein Halbseilstrang sollte 5 Normstürze mit einem Sturzwergicht von 55 kg aushalten.

Ein Zwillingsseil darf im Doppelstrang erst nach 12 Normstürzen mit einem Gewicht von 80 kg reißen.

Die Sturzanlage der Mammut Sports Group AG besteht aus einem ca. 7 m hohen Schacht, dem Sturzwergicht und einer Vorrichtung für die Anhebung des Sturzwergichts. Das Gewicht ist etwa auf halber Höhe des Schachtes mit dem zu testenden Seil zwischengesichert. Es wird mithilfe von Elektromagneten nach oben gefahren und dann fallengelassen. Der Vorgang wird wiederholt, bis das Seil reißt und das Sturzwergicht auf die Schaumstoffmatte am unteren Ende des Schachtes stürzt.

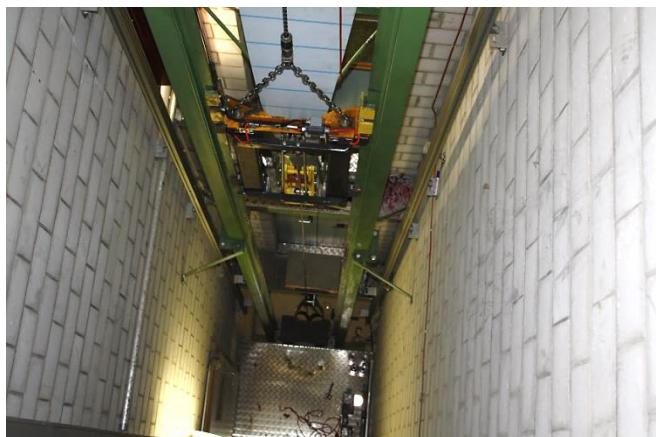


Abb. 15: Sturzanlage der Mammut Sports Group AG in Seon

2.2.5 Fangstoss

In der Sturzanlage wird zudem bei gleichen Sturzbedingungen noch der Fangstoss gemessen. Dieser ist die maximale Kraft, die auf den Einbindepunkt wirkt. Er darf den Wert von 12 kN (bei Halbseilen 8 kN) nicht übersteigen.

2.2.6 Gebrauchsdehnung

Die Dehnung bei einer statischen Belastung (z.B. bei einem Block) nennt man Gebrauchsdehnung.

Zur Prüfung der Gebrauchsdehnung wird das zu prüfende Seilstück in eine Maschine des Herstellers Zwick eingespannt. Zuerst wird es mit einer Kraft vorbelastet, die der Gewichtskraft

von 5 kg entspricht. Danach wird es mit der Kraft belastet, die der Gewichtskraft von 80 kg entspricht.

Der Sollwert der Gebrauchsdehnung ist bei Einfachseilen $\leq 10\%$, bei Halbseilen $\leq 12\%$ und bei Zwillingsseilen $\leq 8\%$.

Die geringe Gebrauchsdehnung ist vor allem eine Komfortfrage. Zu viel Dehnung ist beispielsweise relativ unangenehm bei einem Block.

2.2.7 Dehnung im ersten Sturz

Diese Dehnung wird beim ersten Normsturz in der Sturzanlage getestet. Sie ist sicherheitsrelevanter als die Gebrauchsdehnung, weil sie darüber entscheiden kann, ob ein Kletterer bei einem Sturz auf ein Felsband aufschlägt oder nicht.

Nach der EN-Norm darf die Dehnung nicht grösser als 40% sein.



Abb. 16: Maschine zur Messung der Gebrauchsdehnung

2.2.8 Mantelverschiebung

Wenn sich der Kern und der Mantel gegeneinander verschieben, kommt es zu Verdickungen und Unregelmässigkeiten. Dies erschwert das Sichern und gefährdet somit die Sicherheit.

Zur Prüfung der Kernmantelverschiebung wird ein 2m langes Seilstück fünfmal durch eine Schiene gezogen. In der Mitte wird das Seil durch drei Bolzen gezogen, die jeweils in einem 120-Grad-Winkel zueinander stehen. Jeder Bolzen ist mit einem Loch versehen. Das Seil kann in einer geraden Linie durch alle drei Bolzen geführt werden. Nach dem Einführen des Seils werden die Gewichte an den Bolzen gelöst und die Bolzen werden nach aussen gezogen: Jeder Bolzen wird in eine andere Richtung bewegt. Die Seilführung ist jetzt zickzackförmig.



Nachdem das Seilstück fünfmal durch das Prüfgerät gezogen worden ist, darf die Kernmantelverschiebung höchstens 20 mm betragen. Die modernen Bergseile haben aber eine Kernmantelverschiebung von praktisch 0 mm.

Abb. 17: Vorrichtung zur Prüfung der Kernmantelverschiebung

2.2.9 Knotbarkeit

Um ein möglichst einfaches Handling zu gewährleisten, muss garantiert werden, dass das Seil weder zu weich noch zu steif ist.

Zur Testung der Knotbarkeit werden zwei einfache Überhandknoten mit einer Masse von 10 kg belastet und festgezogen. Danach werden sie nur noch mit 1 kg belastet. Mit einem speziellen Dorn kann der offene Innendurchmesser der Knoten gemessen werden.

Ein Seil gilt als geschmeidig, wenn es folgende Voraussetzung erfüllt:

$$0,8 \leq \frac{\text{Durchschnitt beider Knotendurchmesser}}{\text{Seildurchmesser}} \leq 1,0$$

2.2.10 Wasseraufnahme

Wenn ein Seil viel Wasser aufnimmt, verliert es deutlich an Festigkeit und kann nur noch einen Teil der angegebenen Normstürze aushalten. Deshalb ist der Mantel vieler Seile imprägniert. Durch regelmässigen Gebrauch wird der Mantel aber stark beansprucht und die Imprägnierung verliert ihre Wirkung, das Wasser dringt in den Kern ein. Nach den bisherigen Normen darf die Wasseraufnahme des Seils nicht mehr als 15% betragen.

Eine neue UIAA-Vorgabe (keine Norm) verlangt aber eine Wasseraufnahme von unter 5%. Ein neues Verfahren zur Veredelung des Seils wurde entwickelt: Neuerdings werden Mantel und Kern mit COATINGfinish™ veredelt. Mit diesem Verfahren konnte die Wasseraufnahme auf 1% gesenkt werden.

Die hausinterne Testanlage wird nur noch für Seile benutzt, die nicht mit dem neuen Verfahren veredelt wurden. 15 cm lange Seilstücke werden 2.5 Minuten lang unter einer Brause beregnet. Die Gewichtszunahme darf nicht mehr als 15 % betragen.

Zur Prüfung der neuen Seile wird die Testmethode der UIAA verwendet. Zuerst werden die 50 cm langen Seilstücke 30mal durch eine Aufrauungsvorrichtung gezogen, die im Aufbau ungefähr der Vorrichtung zur Testung der Kernmantelverschiebung entspricht. Ein ausschlaggebender Unterschied ist, dass die Bolzen mit neuen M14-Schraubmuttern versetzt sind. Diese simulieren den Abrieb an Fels und Karabinern.

Die aufgerauten Seilstücke werden 15 Minuten lang mit einer Wassermenge von 2l/min bewässert und dann kurz abgetropft. Die Gewichtszunahme sollte unter 5 % liegen.



Abb. 18 Vorrichtung zur Aufrauung des Seils



Abb. 19 Bewässerungsanlage für die Testmethode der UIAA

2.2.11 Scharfkantenfestigkeit

Wenn ein Bergseil über scharfe Kanten läuft, ist es zusätzlichen Belastungen ausgesetzt. Der Mantel dient als Schutz vor derartigen Belastungen. Bei häufigem Gebrauch wird der Mantel jedoch beschädigt und es kann nicht mehr der ursprüngliche Schutz gewährleistet werden. Die Abnutzung des Seilmantels nennt man auch Abrieb.

Es gibt keine Norm zur Abrieb- oder Scharfkantenfestigkeit. Trotzdem hat Mammut ein Verfahren entwickelt, um den Abrieb unter Laborbedingungen zu testen.

In der Seilabriebanlage werden die Seile maschinell um eine Spule und über eine scharfe Kante gezogen und dabei abgeschleuert. Es können verschiedene Elemente, wie zum Beispiel auch eingeschliffene Karabiner, in die Maschine eingesetzt werden. Mithilfe dieser Vorrichtung kann ein natürlicher Abrieb simuliert werden.

3. Modellversuche

In den Modellversuchen habe ich die Eigenschaften eines Bergseils anhand von einzelnen Seilsträngen untersucht. Die Seilstränge stammen von Produktionsreststücken, die mir von Mammut zur Verfügung gestellt wurden.

3.1 Elastizität

3.1.1 Versuch 1a

Das Ziel des Versuchs ist, zu zeigen, weshalb ein Seil elastisch sein muss, indem die Reißfestigkeit zweier Fadenstücke verglichen wird: Ein Stück normaler Nähfaden und ein Stück desselben Fadens, das mit einem elastischen Teil versehen wird.

Hypothese

Ein elastisches Material kann einen Sturz besser abfedern und hält deshalb mehr.

Versuchsaufbau und Vorgehen

Ein aufgehängtes 0.6m-Fadenstück wird mit einer Masse belastet. Diese wird 0.6m herunterfallen gelassen. Die Masse wird schrittweise erhöht, bis der Faden reißt. Dasselbe wird mit einem Fadenstück, das mit einem elastischen Teil (Gummiring) versehen ist, wiederholt.

Die Länge des Fadenstücks ist mit dem ungedehnten Gummi zusammen auch 0.6 m.

Um zu verhindern, dass der Faden am Knotenpunkt reißt, wird er mehrmals um die Stange gewickelt, an der er hängt. Am unteren Ende wird er um einen Holzring gewickelt, an den nachher die Gewichte gehängt werden.

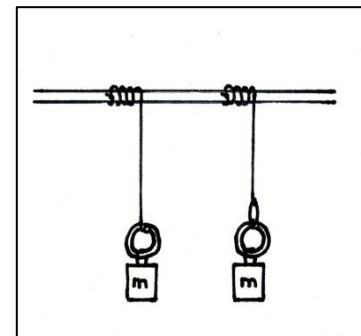


Abb. 18 Versuchsaufbau 1a

Messungen und Ergebnisse

Faden ohne elastischen Teil:

Faden mit elastischem Teil:

Durchschnitt gehalten = 84.2 g

Durchschnitt gehalten = 99.8 g

Durchschnitt gerissen = 89 g

Durchschnitt gerissen = 105.4 g

Auswertung

Mit einem elastischen Teilstück hält der Faden deutlich mehr. Dies liegt daran, dass ein Teil der Kraft durch die Seildehnung aufgenommen wird und der Fangstoss somit verringert wird.

$$F = m * g + \sqrt{m^2 * g^2 + 2 * m * g * E * q * \frac{h}{L}}$$

Die Gummiringe haben einen kleineren Elastizitätsmodul als der Nähfaden. Der Fangstoss ist abhängig vom Elastizitätsmodul. Je kleiner E ist, desto geringer ist auch F .

3.1.2 Versuch 1b

In diesem Versuch sollen die elastischen Reissfestigkeiten von Polyamid 6 und einer normalen Packschnur verglichen werden.

Hypothese

Polyamid 6 ist vermutlich elastischer als die Packschnur und deshalb besser für das Auffangen eines Sturzes geeignet.

Versuchsaufbau und Vorgehen

Die Kernstränge eines Mammut Seils und je nach dem auch die Packschnur werden zu dünneren Strängen aufgedreht. Es wird nicht das ganze Seil getestet, da es nicht möglich ist, die notwendigen Kräfte mit einfachen Mitteln aufzubringen. Die Teilstränge sind entweder 1/9 oder 1/6 so dick wie einer der 11 Kernstränge. Die Stränge werden in zwei Stücke geschnitten.

Der Strang wird wie beim Versuch 1a am Aufhängepunkt und bei der Verbindung zur Masse um Holzringe gewickelt, um das Reißen am Knoten zu vermeiden.

Eine Hälfte des Strangs wird statisch belastet, die andere abrupt durch das Fallenlassen der Masse.

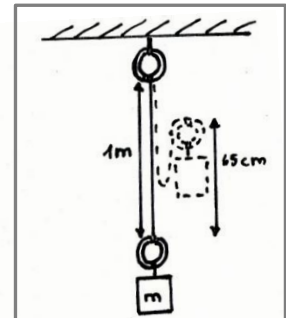


Abb. 19:
Versuchsaufbau 1b

Die Strangstücke sind 1m lang und die Sturzhöhe beträgt ohne die Seildehnung 65 cm.

Messungen und Ergebnisse

Durchschnittswerte:

	Seilstrang	Schnurstrang
Statisch gehalten (g)	15726.42857	16475
Statisch gerissen (g)	15951.42857	16705
Elastisch gehalten (g)	1864.285714	1721.5
Elastisch gerissen (g)	1911.785714	1801.5
$\frac{\text{statisch gehalten}}{\text{elastisch gehalten}}$	8.446827842	9.661948217
$\frac{\text{statisch gerissen}}{\text{elastisch gerissen}}$	8.354479315	9.319926671

Tab. 1

Die Schnurstränge waren viel dicker als die Seilstränge, weil sie sonst zu wenig ausgehalten hätten.

Auswertung

Bergseile werden nicht grundlos aus Polyamid 6 hergestellt. Polyamid 6 ist ein sehr reissfestes Material. Um mit einer Packschnur die gleiche Reissfestigkeit zu erreichen, muss ein sehr

dicker Strang verwendet werden. Weil aber das Volumen und das Gewicht des Bergseils möglichst klein gehalten werden soll, ist die Packschnur somit nicht als Seilmaterial geeignet. Obwohl die Seilstränge so dünn gewählt waren, dass sie statisch im Durchschnitt weniger belastbar waren, hielten sie durchschnittlich elastisch mehr. Das Verhältnis statisch/elastisch ergibt also beim Seilstrang einen kleineren Wert. Daraus kann gefolgert werden, dass Polyamid 6 einen kleineren Elastizitätsmodul hat als die Packschnur. Der Fangstoss ist also beim Polyamid 6 geringer und es ist besser für das Abfangen eines Sturzes geeignet.

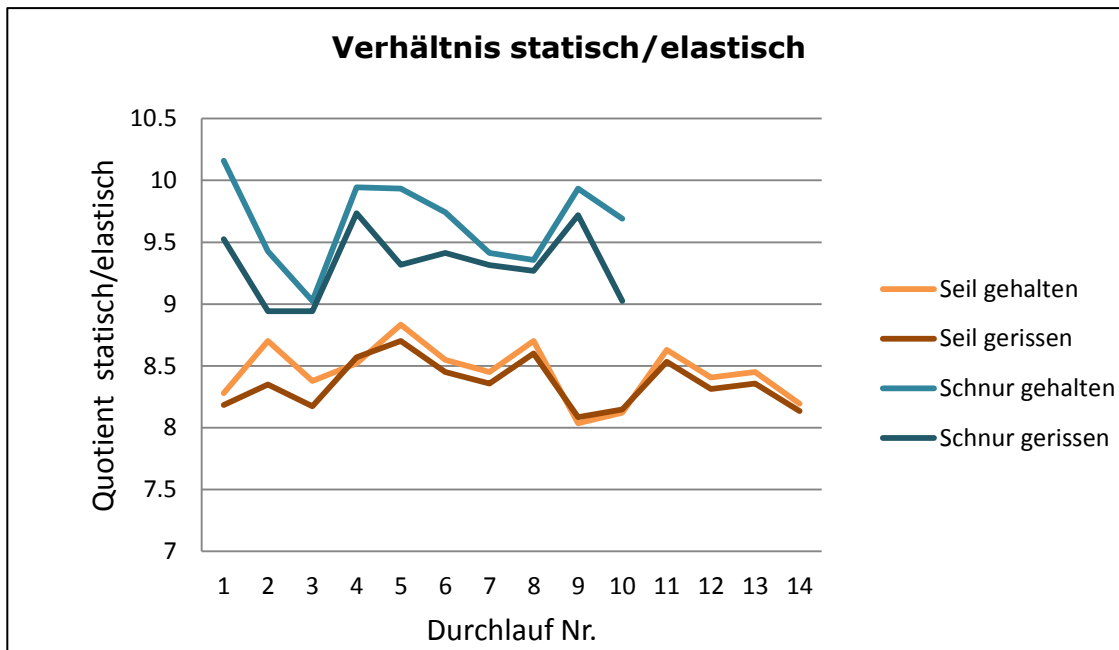


Abb. 20: Verhältnis statisch/elastisch

Statische oder auch dehnungsarme Seile stoppen einen Sturz sehr abrupt. Die Sicherungsmaterialien und auch der Kletterer können dem dabei auftretenden hohen Fangstoss nicht standhalten.

Ein Seil darf jedoch auch nicht zu elastisch sein, weil sich da Seil so stark dehnen könnte, dass der Kletterer auf einem Felsband oder sogar auf dem Boden aufschlagen könnte.

Beide Extremfälle können fatale Folgen haben. Deshalb darf ein Bergseil nur soweit elastisch sein, wie es die Seildehnung erlaubt, ohne eine Gefahr darzustellen. Es muss also eine Art Kompromiss zwischen den Anforderungen „geringer Fangstoss“ und „geringe Seildehnung“ stattfinden.

Ein Seil hält, solange die Spannung die Zugfestigkeit nicht überschreitet:

$$\sigma = \frac{F}{q} \leq R_m$$

Es reißt, sobald die Spannung grösser ist als die Zugfestigkeit:

$$\sigma = \frac{F}{q} > R_m$$

Ohne den Seilstrangquerschnitt kann die Zugfestigkeit nicht ausgerechnet werden. Es ist mit einfachen Mitteln nicht möglich, so dünne Stränge manuell genau abzumessen. Jedoch kann der Strangdurchmesser mithilfe von rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen annäherungsweise bestimmt werden:

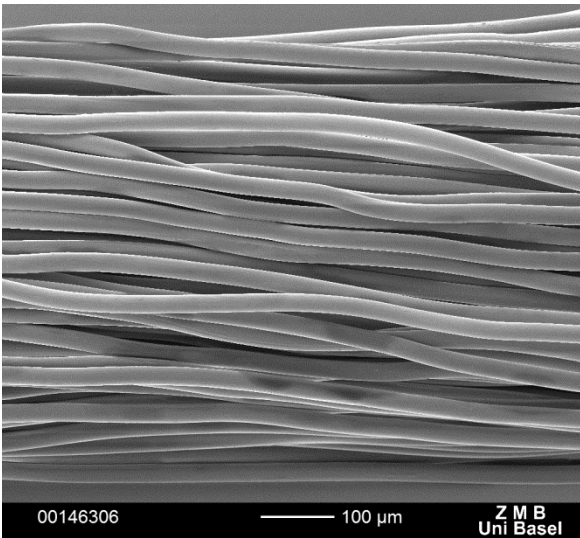


Abb. 21: Seilstrang

Der Strangdurchmesser beträgt etwa 625 μm .

Somit ist der Radius (R) $3.1250 \cdot 10^{-4} \text{ m}$.

Auch der Radius einer einzelnen Faser kann relativ exakt bestimmt werden:

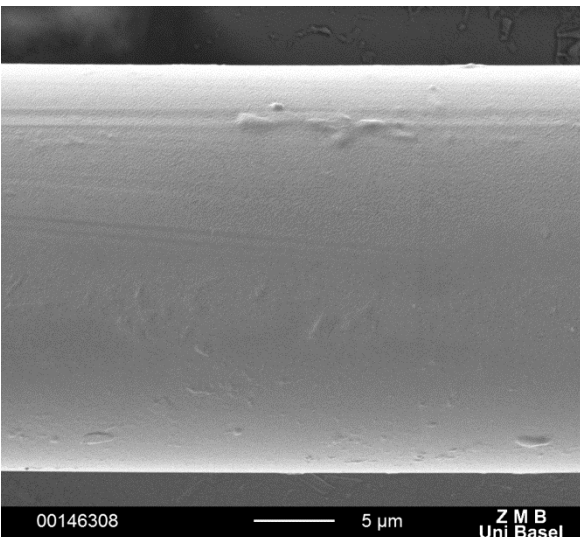


Abb. 22: Seilfaser

Der Durchmesser einer einzelnen Faser beträgt 25.45 μm .

Der Radius (r) beträgt $1.2725 \cdot 10^{-5} \text{ m}$.

Weil die Fasern beim Versuch belastet sind, kann angenommen werden, dass sie so dicht wie möglich zusammenliegen. Die dichtest mögliche Anordnung von Kreisflächen ist erreicht, wenn die Verbindung der Kreismittelpunkte gleichseitige Dreiecke ergibt.

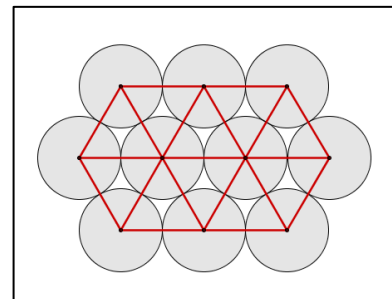


Abb. 23: Anordnung Fasern

Es gibt kleine Lücken zwischen den Kreisflächen, was bedeutet, dass die Fasern eine grössere Fläche als ihren Querschnitt einnehmen. Für die Zugfestigkeit des Strangs ist aber nur der wirkliche Querschnitt ausschlaggebend. Ein Faserquerschnitt braucht gerade so viel Platz, wie ein Rhombus mit einer Seitenlänge von zweimal dem Kreisradius.

Die Strangdichte ρ_{Strang} kann bestimmt werden, indem eine Faserquerschnittsfläche A_{Faser} ins Verhältnis zu einer Rhombusfläche A_{Rhombus} gesetzt wird.

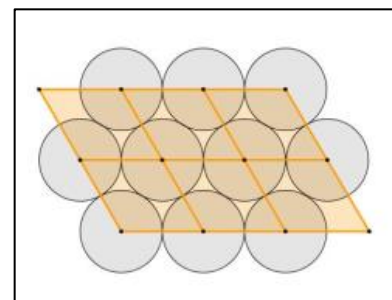


Abb. 24: Rhombusse über Faserquerschnitten

$$A_{Faser} = r^2 * \pi$$

$$A_{Rhombus} = 2 * r * \sqrt{(2 * r)^2 - r^2}$$

$$\rho_{Strang} = \frac{A_{Faser}}{A_{Rhombus}} = \frac{r^2 * \pi}{2 * r * \sqrt{(2 * r)^2 - r^2}} = \frac{r * \pi}{2 * \sqrt{(2 * r)^2 - r^2}}$$

Mit dem bestimmten Strangradius kann die Fläche des Kreises errechnet werden, der den Seilstrang umschliesst.

Wenn diese mit der Strangdichte multipliziert wird, resultiert die wirkliche Querschnittsfläche A_{Strang} des Strangs.

$$A_{Kreis} = R^2 * \pi$$

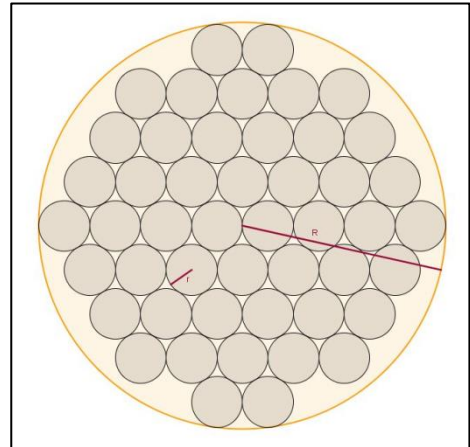


Abb. 25: Skizze des Strangs

$$A_{Strang} = A_{Kreis} * \rho_{Strang} = R^2 * \pi * \frac{r * \pi}{2 * \sqrt{(2 * r)^2 - r^2}} = \frac{R^2 * r * \pi^2}{2 * \sqrt{(2 * r)^2 - r^2}}$$

Mit den bestimmten Radien $r=1.2725*10^{-5} \text{ m}$ und $R=3.1250*10^{-4} \text{ m}$ erhält man die Querschnittsfläche $A_{Strang}=2.7823*10^{-7} \text{ m}^2$

Bei den Messungen 1 bis 12 wurden jeweils zwei solcher Stränge zusammen getestet, bei den Messungen 13 und 14 waren es drei.

$$\text{Somit gilt für die Messungen 1 bis 12: } q = 2 * A_{Strang} = \underline{5.5647*10^{-7} \text{ m}^2}$$

$$\text{Und für die Messungen 13 und 14: } q = 3 * A_{Strang} = \underline{8.3470*10^{-7} \text{ m}^2}$$

Bei den statischen Versuchen hält das Seil, solange gilt

$$\frac{m * g}{q} \leq R_m$$

Es reißt, sobald

$$\frac{m * g}{q} > R_m$$

R_m liegt also zwischen der gehaltenen und der nicht gehalten Spannung:

$$\frac{m_{\text{gehalten}} * g}{q} \leq R_m < \frac{m_{\text{gerissen}} * g}{q}$$

Es wird unterschieden zwischen den Messungen 1-12 und den Messungen 13 und 14, da der Querschnitt q nicht derselbe ist. Für die Masse wird jeweils der Durchschnitt der Versuchsergebnisse verwendet, was mögliche Abweichungen vermindert.

Bei den Messungen 1-12 resultiert
bei den Messungen 13 und 14

$264.67 \text{ MPa} \leq R_m < 268.64 \text{ MPa}$ $235.11 \text{ MPa} \leq R_m < 237.76 \text{ MPa}$
--

Durch das Einsetzen des Fangstosses in der Formel der Zugfestigkeit kann der E-Modul näherungsweise bestimmt werden. Jedoch muss beachtet werden, dass die Fangstossformel bei diesem Versuch eigentlich gar nicht gilt, da ausschliesslich mit dem E-Modul gerechnet werden darf, wenn das Seil nur linear-elastisch verformt wird. In diesem Versuch wird das Seil gedehnt, bis es reisst und deshalb handelt es sich um eine plastische Verformung.

Dieser Aspekt wird in den folgenden Rechnungen ignoriert:

Falls das Seil hält, muss gelten

$$\sigma = \frac{m * g + \sqrt{m^2 * g^2 + 2 * m * g * E * q * \frac{h}{L}}}{q} \leq R_m$$

Wenn das Seil reisst, gilt

$$\sigma = \frac{m * g + \sqrt{m^2 * g^2 + 2 * m * g * E * q * \frac{h}{L}}}{q} > R_m$$

Durch Umformen der Ungleichungen ergibt sich:

$$\frac{L * R_{m(\text{max.})}^2 * q}{2 * m_{(\text{ger.})} * g * h} - \frac{L * R_{m(\text{max.})}}{h} < E \leq \frac{L * R_{m(\text{min.})}^2 * q}{2 * m_{(\text{geh.})} * g * h} - \frac{L * R_{m(\text{min.})}}{h}$$

Bei den Messungen 1-12 resultiert
bei den Messungen 13 und 14

$-206.64 \text{ MPa} \leq E < -203.59 \text{ MPa}$ $-243.85 \text{ MPa} \leq E < -241.14 \text{ MPa}$
--

Da nicht die Richtung der Spannung, sondern ihr Betrag von Interesse ist, dürfen die negativen Vorzeichen ausser Acht gelassen werden.

Somit gilt bei den Messungen 1-12
bei den Messungen 13 und 14

$$206.64 \text{ MPa} \leq E < 203.59 \text{ MPa}$$
$$243.85 \text{ MPa} \leq E < 241.14 \text{ MPa}$$

Von den verschiedenen Angaben zur Zugfestigkeit und zum E-Modul wird wiederum der Durchschnitt ausgerechnet, wobei die Werte von Messungen 1-12 sechsfach einbezogen werden, da es sich auch um sechsmal mehr Messungen handelt.

=> $260.45 \text{ MPa} \leq R_m < 264.23 \text{ MPa}$ Die Zugfestigkeit liegt zwischen 260.45 und 264.23 MPa.

=> $211.96 \text{ MPa} \leq E < 208.96 \text{ MPa}$ Der Elastizitätsmodul liegt zwischen 211.96 und 208.96 MPa.

Jedoch ist das Resultat zum E-Modul, wie schon erwähnt, nicht sehr aussagekräftig, da eine Formel verwendet wurde, die nur für einen Teil der Verformung gilt.

Die Zugfestigkeit von Polyamid 6 ist geringer als die von Stahl (310-630 MPa). Jedoch hat Polyamid 6 auch einen viel kleineren E-Modul ($E\text{-Modul}_{\text{Stahl}} = 210 \text{ GPa}$). Mein in den Versuchen bestimmter E-Modul kann zwar nur als grobe Annäherung gesehen werden, aber der E-Modul für Stahl ist circa 1000mal so gross und deshalb kann man davon ausgehen, dass Polyamid 6 auch tatsächlich elastischer ist als Stahl.

Es ist also nichts anderes als sinnvoll für eher statische Konstruktionen wie zum Beispiel Seilbahnen Stahlseile zu verwenden, da Stahl eine höhere Zugfestigkeit hat. Bei Kletterseilen muss der Fangstoss gering gehalten werden. Deshalb muss ein Kletterseil elastisch sein und es wird aus Polyamid 6 angefertigt, da dieses einen geringeren E-Modul und trotzdem eine relativ hohe Zugfestigkeit hat.

3.2 Scharfkantenfestigkeit

3.2.1 Versuch 2a

Ein Seil läuft oft über scharfe Kanten und muss daher eine hohe Scharfkantenfestigkeit aufweisen. Ziel dieses Versuches ist es, herauszufinden, ob Polyamid 6 ein besonders scharfkantenfestes Material ist. Dazu soll die Scharfkantenfestigkeit von einem Seilstrang aus Kernmaterial, einem Schnurstrang und Tissa-Garn verglichen werden.

Hypothese

Die Packschnur wirkt am robustesten und ist wahrscheinlich sehr scharfkantenfest. Vermutlich ist das Tissa-Garn am wenigsten scharfkantenfest.

Versuchsaufbau und Vorgehen

Die Versuche werden mit 50 cm langen Strängen durchgeführt. Die Stränge werden so gewählt, dass sie möglichst gleich dick sind. Die Schnur und der Seilstrang müssen also auseinandergenommen werden, damit sie gleich dick sind wie das Tissa-Garn.

Als scharfe Kante dient eine Rasierklinge. Diese wird an einer 33 cm hohen Vorrichtung aus Holz befestigt. Im Abstand von 24.8 cm wird auf einer Höhe von 15.7 cm das eine Ende des zu testenden Stranges befestigt. Am anderen Ende wird ein Gewicht von 6 g befestigt. Es wird schräg nach oben gehalten, sodass der Strang eine Gerade bildet und die Rasierklinge berührt. Der Strang sollte weder durchhängen noch gedehnt werden.

Aus dieser Position wird das Gewicht fallengelassen.

Dieser Ablauf wird wiederholt, bis der Strang reißt.

Die Rasierklinge muss für jeden neuen Strang ersetzt werden, damit vermieden werden kann, dass Abweichungen durch die Abnutzung der Klingen entstehen.

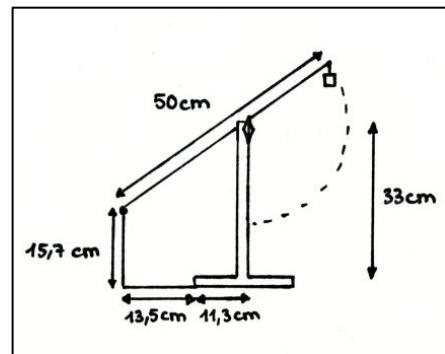


Abb. 26: Versuchsaufbau 2a

Messungen und Ergebnisse

	Seilstrang	Tissa-Garn	Schnurstrang
durchschnittlich gerissen nach ... Durchläufen	7.0	16.4	31.2

Tab. 2

Auswertung

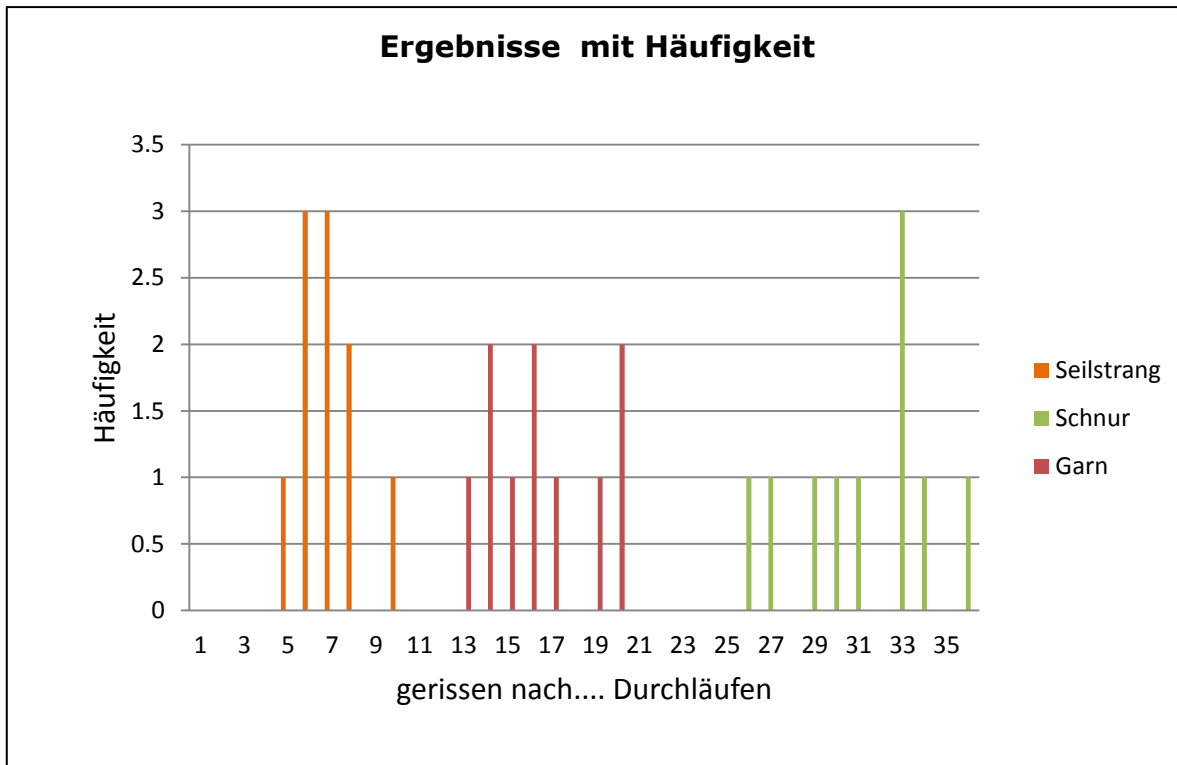


Abb. 27: Ergebnisse mit Häufigkeit

Der Seilstrang hat durchschnittlich deutlich am schlechtesten abgeschnitten. Daraus lässt sich schließen, dass das relativ faserige Polyamid 6 eigentlich nicht sehr scharfkantenfest ist. Sogar das Tissa-Garn hat besser abgeschnitten. Jedoch muss beachtet werden, dass die Stränge zwar alle ziemlich genau gleich dick waren, aber nicht gleich dicht. Der Schnurstrang und das Tissa-Garn waren fest verdreht, während der Seilstrang nur aus einzelnen aus dem Kernmaterial gezogenen Fasern bestand. Es könnte also sein, dass das Tissa-Garn und der Schnurstrang aus mehr Material bestanden obwohl sie denselben Durchmesser hatten wie der Seilstrang.

Zudem könnte es sein, dass eine Drehung oder Flechtung zur Scharfkantenfestigkeit eines Materials beiträgt.

3.2.2 Versuch 2b

In diesem Versuch wird die Scharfkantenfestigkeit von einem offenen, einem gedrehten und einem geflochtenen Seilstrang verglichen. Somit soll gezeigt werden, ob die Flechtung oder Drehung einen Einfluss auf die Scharfkantenfestigkeit hat.

Hypothese

Vermutlich hat die Drehung oder Flechtung einen positiven Einfluss auf die Scharfkantenfestigkeit.

Versuchsaufbau und Vorgehen

Zuerst werden die Teststränge vorbereitet: Als gedrehte Stränge werden normale Kernstränge eines Bergseils verwendet. Für die offenen Stränge werden sie in drei Teilstränge aufgedreht, die aber alle zusammen getestet werden. Auch die geflochtenen Stränge müssen zuerst aufgedreht werden. Danach werden sie zu einem Zopf geflochten. Alle Teststränge bestehen also aus gleichviel Material.

Als scharfe Kante dient wieder eine Rasierklinge, die an die Versuchsvorrichtung aus Versuch 2a angebracht wird.

Zusätzlich ist ein Stab an der Vorrichtung befestigt. Dieser dient als Massstab, damit die Masse immer auf der gleichen Höhe fallengelassen wird. Die Teststränge werden in einem Abstand von 10 cm unten befestigt. Das Ende mit der Masse wird bis zum Stabende hochgehalten und dann fallengelassen. Der Strang hat eine Länge, die genau auf den Abstand zwischen dem Befestigungspunkt und dem Stabende abgestimmt ist.

Wie bei Versuch 2a wird der Vorgang so lange wiederholt, bis der Strang reisst. Die Rasierklingen müssen auch wieder nach jedem Strang ersetzt werden.

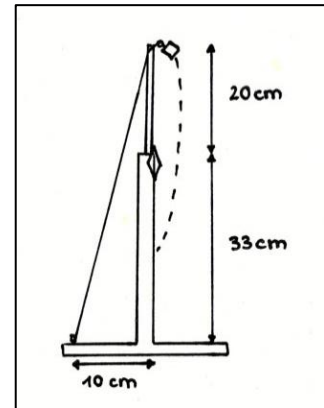


Abb. 28: Versuchsaufbau 2b

Messungen und Ergebnisse

	offen	gedreht	geflochten
durchschnittlich gerissen nach ... Durchläufen	1.9	3.7	10.9

Tab. 3

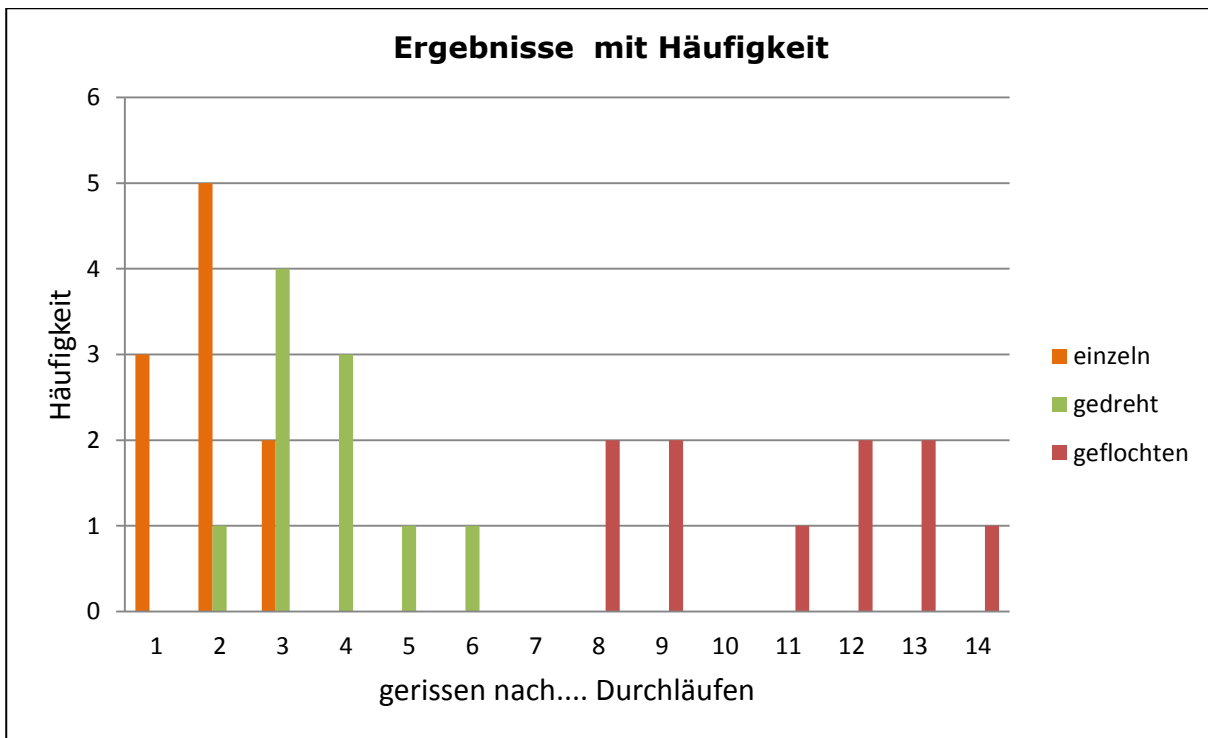


Abb. 29: Ergebnisse mit Häufigkeit

Auswertung

Wie erwartet sind die offenen Stränge am wenigsten scharfkantenfest. Die Drehung verbesserte die Scharfkantenfestigkeit nur wenig. Gedrehte Stränge sind also nur für das Kernmaterial und nicht für den Mantel eines Seils geeignet. Durch die Flechtung konnte die Scharfkantenfestigkeit stark gesteigert werden.

Bei einem geflochtenen Strang sind die Fasern am dichtesten zusammen und die Angriffsfläche für die Rasierklinge ist somit sehr klein. Beim offenen Strang laufen mehrere Fasern parallel nebeneinander und sie können gleichzeitig durchtrennt werden. Das bedeutet, dass ein dichter Strang scharfkantenresistenter ist als ein loser Strang.

Ein geflochtener Mantel bringt somit vor allem zwei Vorteile: Die einzelnen Stränge des Kerns können zusammengehalten werden, ohne dass sie ineinander verdreht sind und das Seil ist geschützt vor scharfen Kanten.

4. Diskussion der Resultate

4.1 Risiko

Wie bei fast jeder anderen Sportart kann es natürlich auch beim Klettern zu Sportverletzungen kommen. Jedoch sind diese bei Kletterern deutlich seltener anzutreffen als beispielsweise bei Fussballern. Im Gegensatz zu den meisten anderen Sportarten kann es beim Klettern leider auch zu Unfällen mit letalen Folgen kommen.

Als ich mich mit den Unfallstatistiken auseinandersetzte, wurde bald ersichtlich, dass Unfälle beim Klettern meist auf das Fehlverhalten des Kletterers oder des Sichernden zurückzuführen sind. Mangelhaftes oder abgenutztes Material ist nur äusserst selten die Unfallursache. Viel mehr wird das Material oft falsch eingesetzt und kann deshalb nicht die optimale Sicherheit garantieren. Wenn man sich der Situation entsprechend verhält und sich angemessen absichert, kann man eigentlich davon ausgehen, sicher zu sein.

Ein gewisses Restrisiko bleibt immer. Jedes Jahr kommt es zu tragischen Unglücken, bei denen auch erfahrene Alpinisten oder sogar Bergführer ums Leben kommen. Teilweise ist der Unfall auch hier auf ein Fehlverhalten oder eine falsche Einschätzung der Situation zurückzuführen, jedoch erscheint es mir falsch nach einem Schuldigen zu suchen. Jeder Alpinist ist sich der Risiken des Bergsports bewusst und muss für sich selbst entscheiden, wie weit er gehen möchte. Teilweise kann es sogar lohnend sein, ein Risiko auf sich zu nehmen. Die resultierenden Momente können unbezahlbar wertvoll sein.

In seinem Buch „High - Genial unterwegs an Berg und Fels“ schreibt David Lama nach einem schockierenden Unfall eines Alpinisten in Patagonien:

„Fabio Giacomellis Tod schockierte uns für einen Moment. Er schockierte uns, weil er in Erinnerung rief, was wir selbstverständlich wussten. Was jeder Alpinist weiss, sobald er ausgesetzte Touren geht: dass es auch schlimm ausgehen kann. Wer hier unterwegs ist, geht das Risiko ein, nicht mehr zurückzukommen. Wir wissen das, und Fabio wusste es auch, und ich weiss, dass es hart klingt und vielleicht das Verständnis von Menschen, die nie auf dem Berg waren, überfordert, aber man muss lernen, mit diesem Risiko zu leben. Jeder von uns weiss um die Gefahren des Kletterns, und jeder von uns lässt sich auf diese Gefahren ein. Denn das Erlebnis, das wir nur bekommen, wenn wir das Risiko eingehen, ist dieses Risiko wert.“²⁸

Für Lama ist das Risiko eine Selbstverständlichkeit. Auch für ihn ist das Erlebnis das ausschlaggebende Argument, ein Risiko einzugehen.

Das Risiko betreffend ist es meiner Meinung nach wichtig, die eigene Schmerzgrenze genau zu definieren. Richtig gefährlich wird es meistens erst dann, wenn man Angst hat, denn Angst macht unberechenbar und grenzt das Denkvermögen ein. Deshalb sollte ein Alpinist meiner Meinung nach nur so weit gehen, wie er es für sich selbst verantworten kann.

4.2 Physik bei Stürzen

Ich wollte berechnen, welche Kräfte in unterschiedlichen Situationen auf das Seil wirken. Bei einer statischen Belastung entspricht diese Kraft genau der Gewichtskraft. Bei Stürzen kann die maximal auf das Seil wirkende Kraft mit der Fangstossformel berechnet werden. Ein Sturz

²⁸ High: Lama, 2010

(S. 25)

im Vorstieg unterscheidet sich physikalisch nur durch den Sturzfaktor von einem gewöhnlichen Topropesturz.

$$F = m * g + \sqrt{m^2 * g^2 + 2 * m * g * E * q * \frac{h}{L}}$$

Die Formel für den Fangstoss beinhaltet den E-Modul und ist deshalb nur gültig, solange das Seil nur linear-elastisch verformt wird und somit nur im linearen Teil des Spannungs-Dehnungs-Diagramms.

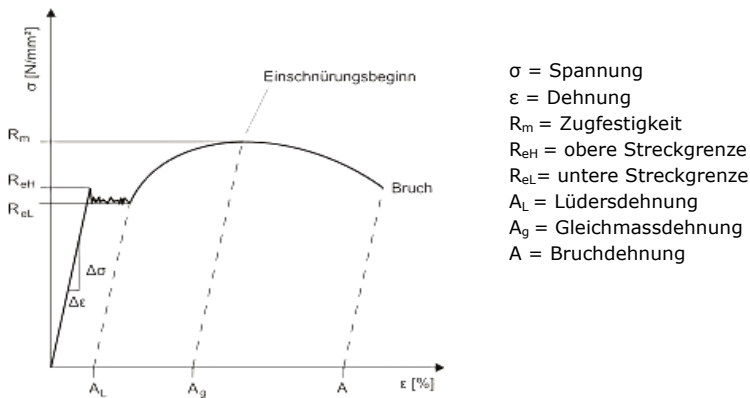


Abb. 32: Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Die Zugfestigkeit ist die maximale Spannung, die ein Seil aushält. In meiner Formel zur Zugfestigkeit verwende ich für die bei einem Sturz wirkende Kraft die Fangstossformel.

Das Seil reißt, sobald gilt:

$$\sigma = \frac{m * g + \sqrt{m^2 * g^2 + 2 * m * g * E * q * \frac{h}{L}}}{q} > R_m$$

Bis die Zugfestigkeit eines Materials erreicht wird, ist es schon lange plastisch verformt. Deshalb dürfte die Fangstossformel hier eigentlich nicht verwendet werden. Es ist mir jedoch leider nicht gelungen, eine andere vom E-Modul unabhängige Formel herzuleiten.

In meiner Auswertung zum Versuch 1b habe ich mithilfe der Formel für die Zugfestigkeit den E-Modul und die Zugfestigkeit von Polyamid 6 bestimmt. Die Zugfestigkeit konnte ich mithilfe der statischen Messwerte und somit ohne die Fangstossformel bestimmen. Deshalb können meine Resultate als Annäherung an den wirklichen Materialkennwert gesehen werden.

Den E-Modul musste ich jedoch mithilfe der Fangstossformel berechnen und deshalb sind meine Resultate zum Elastizitätsmodul nicht sehr aussagekräftig.

Um den E-Modul korrekt zu bestimmen, müsste man ein Seil im linear-elastischen Bereich belasten, die wirkende Kraft und die Seildehnung messen und dann in die Fangstossformel einsetzen.

Im Internet findet man unterschiedlichste Angaben, was den E-Modul und die Zugfestigkeit von Polyamid 6 angeht, weil es auch in sehr unterschiedlichen Formen erhältlich ist. Deshalb konnte ich meine Resultate nicht vergleichen oder sogar verifizieren. Ich habe auch bei

Mammut nach den Materialkennwerten gefragt, aber auch dort sind die Werte unbekannt, da sie für die Testmethoden der Mammut Sports Group AG irrelevant sind.

Bei den Versuchen zur Scharfkantenfestigkeit konnte ich nichts berechnen, sondern nur Beobachtungen machen. Ich kam zum Schluss, dass Polyamid 6 kein besonders scharfkantenresistentes Material ist. Jedoch fand ich auch heraus, dass die Scharfkantenfestigkeit durch eine Flechtung oder Drehung gesteigert werden kann.

4.3 Testmethoden der Mammut Sports Group AG

Um zu sehen, wie Seile getestet werden, ging ich nach Seon ins Testlabor der Mammut Sports Group AG.

Mir wurden die Methoden vorgestellt, mit denen untersucht werden kann, ob ein Seil intakt ist. Während jeder einzelne Seilmeter von Sensoren abgetastet und auf Fehler untersucht wird, werden die Tests in der Sturzanlage, wie beispielsweise die Messung des Fangstosses, nur an kurzen Stücken einer Seilcharge durchgeführt. Jeder verkaufte Seilmeter hat unzählige Kontrollen durchlaufen. Deshalb kann man davon ausgehen, dass ein neu gekauftes Seil bei normalem Gebrauch wirklich hält.

Ein Kletterseil, das oft gebraucht wird, kann irgendwann nicht mehr die ursprüngliche Sicherheit gewährleisten. Mit der Zeit wird es stark abgenutzt und muss ersetzt werden. Das eigene Seil kann man nur dadurch testen, indem man es Meter für Meter durch die Hand zieht und nach Unregelmässigkeiten absucht. Dies ist zwar sehr aufwendig, jedoch aber auch unglaublich wichtig und meiner Meinung nach sollte einem kein Aufwand zu gross sein, wenn es um Sicherheit geht.

Schlusswort

Nach der Erleichterung, ein Thema gefunden zu haben, war ich eine Zeit lang relativ unschlüssig darüber, was als erstes zu tun ist. Es fiel mir auch schwer einen Arbeitsplan zu machen, da ich wusste, dass im Verlauf der Zeit sicher auch noch mehr Arbeiten auftauchen würden, die man nicht im Voraus einplanen kann. Nachdem ich mich an das selbstständige Arbeiten gewöhnt hatte, kam ich relativ schnell vorwärts. Schon im Oktober hatte ich einen Termin bei der Mammut Sports Group AG. Bis zur Freistellungswoche beschäftigte ich mich hauptsächlich mit den theoretischen Grundlagen. Dann standen die Modellversuche auf dem Plan. Diese waren um einiges aufwändiger als gedacht. Deshalb konnte ich in der doppelten Zeit nur etwa halb so viele Messungen machen, wie es eigentlich geplant war. Auch die Auswertung der Versuche brauchte viel Zeit. Trotzdem war ich alles in allem immer noch gut in der Zeit und somit blieb mir der Stressfaktor erspart.

Mein grösstes Problem bei der Arbeit war es, zu entscheiden, was als nächstes getan werden musste. Ich konnte mich auch nicht immer an den Arbeitsplan halten, da mir eine Tätigkeit nach einer Zeit verleidete. Deshalb gönnte ich mir auch beim Arbeiten ein wenig Abwechslung, indem ich an mehreren Dingen gleichzeitig arbeitete. Es gab natürlich auch Dinge, die ich immer vor mir herschob, weil ich die Motivation dazu nicht finden konnte. Dazu gehörten beispielsweise das Quellenverzeichnis, das Abstract und die Einleitung. Das Arbeiten am Hauptteil war für mich eindeutig viel interessanter und lehrreicher.

Insgesamt hat mir meine Arbeit sehr gut gefallen, da sie sehr vielseitig und abwechslungsreich war und ich mich mit meinem Hobby beschäftigen konnte. Durch diese Arbeit habe ich gelernt, was es bedeutet selbstständig zu arbeiten. Ich weiss nun, wie man sich eine Arbeit am besten einteilen sollte, ohne dass sie einem verleidet.

Abkürzungsverzeichnis und Glossar

EN	Europäische Norm
HMS	Halbmastwurfsicherung
JO	Jugendorganisation des SAC (Schweizer Alpenclub)
UIAA	Union Internationale des Associations d'Alpinisme, auf Deutsch: „Internationale Union der Alpinismusvereinigungen“
ZMB	Zentrum für Mikroskopie der Universität Basel

Literaturliste und Abbildungsverzeichnis

Bücher und Zeitschriften

Alpin-Lehrplan:	Hoffmann, Michael und Pohl, Wolfgang. 2003. Alpin-Lehrplan Band 2 - Felsklettern, Sportklettern. BLV. München
Bergsport Sommer:	Winkler, Kurt und Brehm, Hans-Peter und Haltmeier, Jürg. 2006. Bergsport Sommer Technik, Taktik, Sicherheit. SAC-Verlag. Bern
Expressen:	Hasler, Bruno. Gefährliche Expressen in der Route. Die Alpen. 12 2012. Seite 33
High:	Lama, David. High – Genial unterwegs an Berg und Fels. 2010. Albrecht Knaus Verlag. München
Karabiner:	Winkler, Kurt. Wenn Karabiner versagen. Die Alpen. 06 2014. Seite 28-29
Risiko Bergsteigen :	Mosimann, Ueli. Wie gefährlich ist Bergsteigen?. Die Alpen. 06 2014. Seite 48-53
Schlingen:	Semmel, Chris. Dünn, glatt und in Verruf: Dyneema. Die Alpen. 05 2014. Seite 29-31

Internet

Achter:	Outdoorseiten. Hardware – Outdoor Wiki. http://www.outdoorseiten.net/wiki/Hardware#Achter (8.1.2015)
Bruchdehnung:	Kummetat, Christoph. Betonstahl - Glossar (Bruchdehnung). http://www.kummetat.de/ksh/service/glossar/bruchdehnung.htm (22.12.2014)

Edelrid:	EDELRID GmbH & Co. KG. Firmengeschichte EDELRID. http://www.edelrid.de/Firmengeschichte/ (1.3.2015)
Eingeschliffene Expressen:	Hasler, Bruno. Medienmitteilung_SAC_Seilrissgefahr_durch_belassene_Expressschlinge.pdf. www.sac-cas.ch/fileadmin/sac/PDF-Dateien/Medien/Medienmitteilung_SAC_Seilrissgefahr_durch_belassene_Expressschlinge.pdf (26.1.2015)
Friends:	Wikipedia. Klemmgerät – Wikipedia. http://de.wikipedia.org/wiki/Klemmgerat (28.12.2014)
Grigri:	Wikipedia. Grigri-Wikipedia. http://de.wikipedia.org/wiki/Grigri (8.1.2015)
Keile:	Perwitzschky, Olaf. Sitzt, passt, wackelt nicht: Klemmkeile - alpin.de. http://www.alpin.de/bergschule/8a908948-533e-4a5a-b283-20f2ba14d917/sitzt-passt-wackelt-nicht_klemmkeile/news.html (28.12.2014)
Klettergurt:	Mammut Sports Group AG. Gurttypen. http://www.mammut.ch/de/harnesses_explanation_types.html (28.12.2014)
Seilfibel:	Mammut Sports Group AG. Mammut_Seilfibel. http://www.mammut.ch/images/Mammut_Seilfibel_D_web_111129.pdf (25.1.2015)
Spannungsdehnungsdiagramm:	Wikipedia. Spannungs-Dehnungs-Diagramm – Wikipedia. http://de.wikipedia.org/wiki/Spannungs-Dehnungs-Diagramm (22.12.2014)
Streckgrenze:	Kummetat, Christoph. Betonstahl - Glossar (Streckgrenze). http://www.kummetat.de/ksh/service/glossar/streckgrenze.htm (22.12.2014)
SUVA:	SUVA. Wagnisse - Gefährliche Sportarten - Prävention – Suva. http://www.suva.ch/startseite-suva/praevention-suva/sichere-freizeit-suva/wagnisse-suva.htm
Zugfestigkeit:	Kummetat, Christoph.. Betonstahl - Glossar (Zugfestigkeit). http://www.kummetat.de/ksh/service/glossar/zugfestigkeit.htm (22.12.2014)
Zugversuch:	Wikipedia. Zugversuch – Wikipedia. http://de.wikipedia.org/wiki/Zugversuch (22.12.2014)

Anderes

Dealer-Workbook	Dealer-Workbook Summer 2015, Mammut Sports Group AG (internes Handbuch der Mammut Sports Group AG)
Prüfprotokolle:	Prüfprotokolle für Bergseile der Mammut Sports Group AG (interne Dokumente)
Tendon:	dynamische und statische Seile – Handbuch (Seilhandbuch der Marke Tendon)
Testlabor:	Ich durfte das Testlabor der Mammut Sports Group AG in Seon (AG) besichtigen. Dabei erklärte mir Katalin Dozsa vom Rope Development die Testmethoden.
Zentrum für Mikroskopie der Universität Basel (ZMB):	Ich durfte mit dem Rasterelektronenmikroskop und einer Stereolupe des Biozentrums der Uni Basel Aufnahmen von Seilfasern machen. Informationen zur Rasterelektronenmikroskopie bekam ich von Evi Bieler.

Abbildungen

Titelbild	Vordergrund: von Autor, Hintergrund: http://img.archiexpo.de/images_ae/photo-g/bodenfliese-schiefer-49730-7667429.jpg
Abb. 1-3	Diagramme von Autor, Daten: Mosimann, Ueli. Wie gefährlich ist Bergsteigen?. Die Alpen. 06 2014. Seite 48-53
Abb. 4	Winkler, Kurt und Brehm, Hans-Peter und Haltmeier, Jürg. 2006. Bergsport Sommer Technik, Taktik, Sicherheit. SAC-Verlag. Bern. Seite 72
Abb. 5	Winkler, Kurt und Brehm, Hans-Peter und Haltmeier, Jürg. 2006. Bergsport Sommer Technik, Taktik, Sicherheit. SAC-Verlag. Bern. Seite 212
Abb. 6	Bild1: http://t3.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcRHBzNTBn6jZP0q1gojJsT-Rfu6wEQWfha-7_qC46lxRVovej-I (3.1.15) Bild2&3: http://www.solstice.de/cms/upload/pdf/KLETTERN.pdf Seite 15 (28.12.14)
Abb. 7&8	Winkler, Kurt und Brehm, Hans-Peter und Haltmeier, Jürg. 2006. Bergsport Sommer Technik, Taktik, Sicherheit. SAC-Verlag. Bern. Seite 73-74
Abb. 9	Semmel, Chris. Dünn, glatt und in Verruf: Dyneema. Die Alpen. 05 2014. Seite 29

Abb. 10-12	Von Autor: gemacht am Zentrum für Mikroskopie der Universität Basel (ZMB)
Abb. 13&32	http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/6/6e/Spgs-Dehnungs-Kurve_Streckgrenze.svg/319px-Spgs-Dehnungs-Kurve_Streckgrenze.svg.png (4.1.15)
Abb. 14-19	Von Autor: Besuch Testlabor
Abb. 20&21	Skizzen von Autor
Abb. 22	Von Autor: Messergebnisse
Abb. 23&24	Von Autor: gemacht am Zentrum für Mikroskopie der Universität Basel (ZMB)
Abb. 25-27	Von Autor
Abb. 28	Skizze von Autor
Abb. 29	Von Autor: Messergebnisse
Abb. 30	Skizze von Autor
Abb. 31	Von Autor: Messergebnisse

Tabellen

Tab. 1-3	Von Autor: Messergebnisse
----------	---------------------------

Anhang

Versuch 1 a Faden/Gummi...			
		gehalten (g)	gerissen (g)
ohne elastischen Teil:		84	93
		83	88
		86	90
		84	88
		84	86
	Durchschnitt:	84.2	89
mit elastischem Teil:		100	108
		102	108
		100	106
		96	101
		101	104
	Durchschnitt:	99.8	105.4

Versuch 1b			
Strangquerschnitt (q)	Messungen 1-12	5.56467E-07	m
	Messungen 13-14	8.347E-07	m
Sturzhöhe (h)		0.65	m
Ausgegebene Länge (L)		1	m

$$\frac{L * R_{m(max.)}^2 * q}{2 * m_{(ger.)} * g * h} - \frac{L * R_{m(max.)}}{h} < E \leq \frac{L * R_{m(min.)}^2 * q}{2 * m_{(geh.)} * g * h} - \frac{L * R_{m(min.)}}{h}$$

Stück	statisch gehalten	statisch gerissen	elastisch gehalten	elastisch gerissen	Verhältnis gehalten	Verhältnis gerissen
1	15705	15905	1805	1905	8.700831025	8.34908136
2	14705	14755	1755	1805	8.378917379	8.17451524
3	13505	13755	1585	1605	8.520504732	8.57009346
4	15505	15705	1755	1805	8.834757835	8.70083102
5	15005	15255	1755	1805	8.54985755	8.45152355
6	15255	15505	1805	1855	8.451523546	8.35849057
7	15705	15955	1805	1855	8.700831025	8.60107817
8	14505	14755	1805	1825	8.03601108	8.08493151
9	14255	14505	1755	1780	8.122507123	8.1488764
10	16005	16255	1855	1905	8.628032345	8.5328084
11	14755	15005	1755	1805	8.407407407	8.31301939
12	15255	15505	1805	1855	8.451523546	8.35849057
13	21755	22005	2655	2705	8.193973635	8.1349353
14	18255	18455	2205	2255	8.278911565	8.18403548
				Durchschnitt	8.459744479	8.36759038
A	11255	11505	1108	1208	10.15794224	9.52400662
B	21255	21505	2255	2405	9.425720621	8.94178794
C	21255	21505	2355	2405	9.025477707	8.94178794
D	13505	13705	1358	1408	9.944771723	9.73366477
E	11005	11255	1108	1208	9.932310469	9.31705298
F	20505	20755	2105	2205	9.741092637	9.41269841
G	20755	21005	2205	2255	9.412698413	9.31485588
H	22505	22755	2405	2455	9.357588358	9.2688391
I	11005	11255	1108	1158	9.932310469	9.7193437
J	11705	11805	1208	1308	9.689569536	9.02522936
				Durchschnitt	9.661948217	9.31992667

	Durchschnitt 1-12	Durchschnitt 13&14
statisch gehalten	15013.33333	20005
statisch gerissen	15238.33333	20230
elastisch gehalten	1770	2430
elastisch gerissen	1817.083333	2480
	Messungen 1-12	Messungen 13-14
Rm min (Pa)	264671374.7	235113270.5
Rm max (Pa)	268637919.5	237757633.7
Durchschnitt Rm min (Pa)	260448788.4	
Durchschnitt Rm max (Pa)	264226450.1	
E min (Pa)	-206644553.5	-243853983.3
E max (Pa)	-203593365.1	-241141815.9
Durchschnitt E min (Pa)	-211960186.3	
Durchschnitt Em max (Pa)	-208957429.5	

Versuch 2a											Durchschnitt:
Seilstrang	7	8	8	10	7	6	6	7	5	6	7.00
Schnur	33	31	26	34	33	27	30	36	33	29	31.20
Garn	16	13	19	20	14	15	14	16	20	17	16.40

Häufigkeit:	Seilstrang	Schnur	Garn
5	1		
6	3		
7	3		
8	2		
9			
10	1		
11			
12			
13			1
14			2
15			1
16			2
17			1
18			
19			1
20			2
21			
22			
23			
24			
25			
26		1	
27		1	
28			
29		1	
30		1	
31		1	
32			
33		3	
34		1	
35			
36		1	

Versuch 2b											Durchschnitt:
offen	2	2	1	3	2	1	1	2	2	3	1.9
gedreht	3	6	4	3	4	3	5	2	3	4	3.7
geflochten	12	14	13	8	9	11	13	9	8	12	10.9

Häufigkeit:	offen	gedreht	geflochten
1	3		
2	5	1	
3	2	4	
4		3	
5		1	
6		1	
7			
8			2
9			2
10			0
11			1
12			2
13			2
14			1