

Energie ist Kraft mal Weg

Sicherungstheorie, Teil 1

von Walter Fimml und Michael Larcher

Zahllose Sportkletterstürze in der Halle bei jeder Meisterschaft, Sprünge in die Gletscherspalte bei jeder Bergrettungsübung, Kletterer, die sich zum Nervenkitzel von Brücken in die Tiefe stürzen, Bungee-Jumping aus mehr als 100 m Höhe – gibt es eigentlich noch ein echtes Risiko beim Sturz?

In zwei Teilen wollen wir die physikalischen Zusammenhänge vorstellen, die zwar keinen Sturz verhindern können, aber deren prinzipielles Verständnis für die richtige Wahl und Anwendung der Ausrüstung entscheidend sein kann, um im Fall des Falles die Folgen so gering wie möglich zu halten. In diesem ersten Teil erläutern wir die wichtigsten physikalischen Grundlagen, die am Beispiel eines fiktiven Klettersteigsturzes mit konkreten Zahlen gefüllt werden.

Energie, Kraft, Weg ...

Grau ist alle Theorie! Dieser Satz stimmt zwar für viele Bereiche des Bergsteigens, doch gerade beim Thema Sturz ziehe ich persönlich ein wenig Theorie bzw. Ergebnisse aus Testversuchen eindeutig einer vertieften Praxis und jahrelanger persönlicher Erfahrung vor.

Die zentralen Begriffe in unserer „kleinen Sturzphysik“ sind Energie, Kraft und Weg.

Insbesondere interessieren uns:

- die **Sturzenergie**,
- die **Fangstoßkraft**, die Bremskraft und das menschliche Gewicht, sowie
- der **Sturzweg** (Sturzhöhe) und der **Bremsweg**

Diese drei Begriffe stehen zueinander in sehr enger Beziehung:

Energie = Kraft x Weg

oder die Zauberformel in der Sprache der Physik:

$$E = F \times h$$

Energie

Energie begegnet uns im Bergsport in unterschiedlichen Formen - als potentielle Energie (E_{pot} , Lageenergie), als kinetische Energie (E_{kin} , Energie der Bewegung) oder als Wärmeenergie. Energie kann bekanntlich nicht vernichtet, sondern nur von einer Form in eine andere umgewandelt werden. Im Falle eines Sturzes ins Seil z.B. wird diese Sturzenergie in Deformationsenergie (Dehnung des Seiles) und Wärmeenergie (heißes Sicherungsgerät) umgewandelt.

Die für uns interessante Sturzenergie hängt also - entsprechend obiger Formel - einzig von unserem Körpergewicht und unserer Fallhöhe ab.

E_{pot} und E_{kin}

Beim Hinaufklettern wird mit Muskelkraft ein Stück Weg, oder besser, eine gewisse Höhe gegen die Kraft der Erdanziehung zurückgelegt. Dabei wird Energie in Form von potentieller Energie (E_{pot}) im Körper gespeichert.

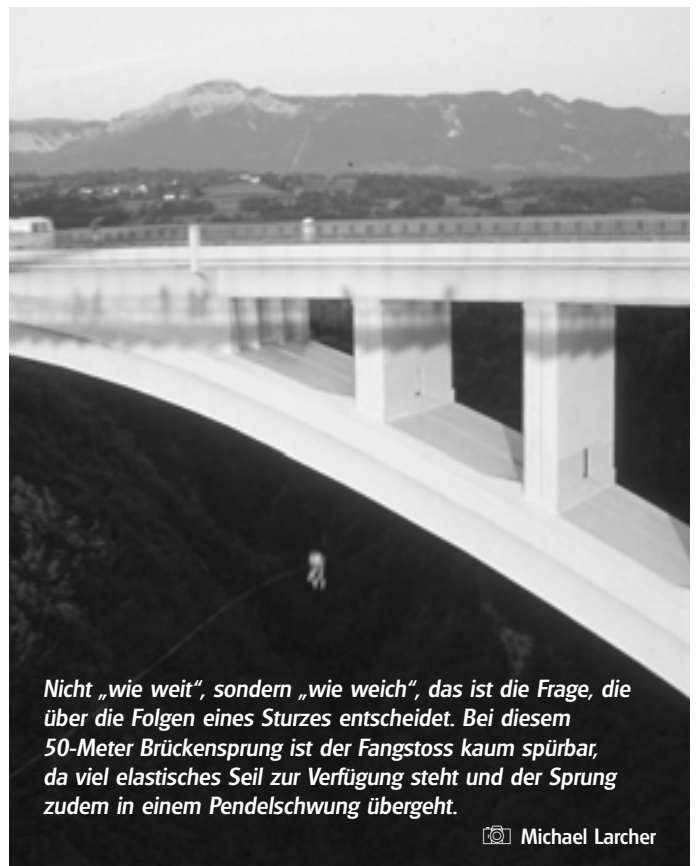
Beim Sturz wird nun diese Energie in Bewegungsenergie umgewandelt (E_{kin}) und genau diese Energie wird nun unser Problem: Sie wird nämlich in Wärme (das ist noch kein Problem - außer evtl. für die Handflächen des Sichernden) und in Deformationsenergie (Knochenbrüche, Materialdehnung oder -bruch) umgewandelt.

Genau diese Energie gilt es also während des Bremsvorganges so umzuwandeln, dass wir mit heiler Haut davon kommen.

Kraft

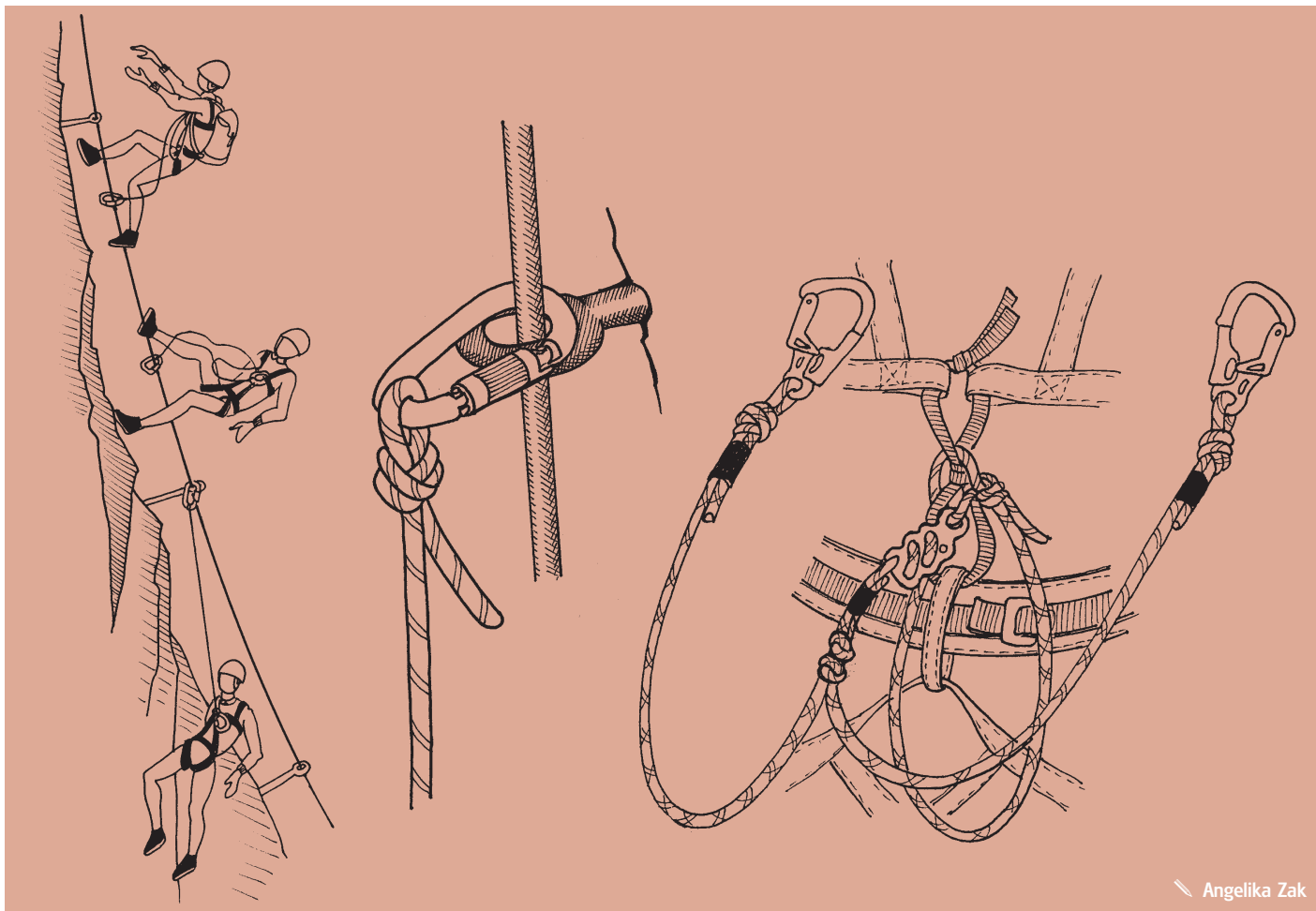
Wie die Energie begegnet uns auch die Kraft beim Klettern und Bergsteigen in unterschiedlichen Formen: als Reibungskraft, Bremskraft, Bruchlast, Fangstoßkraft, Reißfestigkeit und Gewicht (unser Körpergewicht ist eine Kraft!).

Die Maßeinheit - sie wurde bereits erwähnt - ist das Newton [N]. Übliche Abkürzungen sind 1 kN (Kilonewton = 1000 N) 1 daN (Dekanewton = 10 N) - wird vor allem deshalb verwenden-



Nicht „wie weit“, sondern „wie weich“, das ist die Frage, die über die Folgen eines Sturzes entscheidet. Bei diesem 50-Meter Brückensprung ist der Fangstoß kaum spürbar, da viel elastisches Seil zur Verfügung steht und der Sprung zudem in einem Pendelschwung übergeht.

© Michael Larcher



Der Fangstoß, der am Klettersteig ohne Verwendung einer Klettersteigbremse auftreten könnte, gleicht einem Frontalzusammenstoß mit dem Auto! Bei einem 5 m-Sturz wird man auf einer Strecke von nur ca. 10 cm von 35 km/h auf Null abgebremst. Einzige Knautschzone: der Körper des Kletterers. Durch Verwendung einer Klettersteigbremse („Fangstoßdämpfer“) können die Kräfte auf ein verträgliches Maß reduziert werden. Eine sehr ungünstige Belastungssituation kann zudem für den Karabiner entstehen. Ein weiteres Argument für das Y-System, bei dem immer beide Stränge eingehängt werden können.

det, da 1 daN etwa einem alten Kilopond entspricht. Da wir uns immer noch nicht ganz von Kilopond verabschiedet haben, kann man etwas schlampig sagen: **1 kp = 10 N** oder umgekehrt **1 N = 0,1 kp**. 1 kN wären dann also 100 kp.

Übrigens. Für den Begriff „Gewicht“ verwendet man im Alltag anstelle der Einheit Newton oft die falsche Maßeinheit Kilogramm [kg], die eigentlich ein Maß für die Masse ist. Das spielt auch keine große Rolle, solange sich dieses Gewicht nicht bewegt. Aber springen Sie einmal auf Ihre Badezimmerwaage und erschrecken Sie, wie Sie zugezogen haben ... Auf der Erde gilt: die Masse von 1 kg in Ruhe hat ein Gewicht von 9.81 Newton, also ca. 1 kp.

Fangstoßkraft

Die Kraft, die während des Sturzabfangens im Seil auftritt, wird als **Fangstoßkraft** bezeichnet. Die im Seil auftretende Fangstoßkraft wirkt auf alle Glieder der Sicherungskette, auf die Zwischen-sicherung sogar doppelt.

(Brems-)Weg

Die Länge des Bremsweges ist der bestimmende Faktor für die bei einem Sturz auftretenden Kräfte! Energie = Kraft x Weg – das bedeutet: doppelter Bremsweg, halbe Fangstoßkraft.

Zugespitzt lässt sich also formulieren: nicht „wie weit“, sondern „wie weich“, das ist die Frage, die über die Folgen eines Sturzes entscheidet. Mit anderen Worten: Je kürzer der Bremsweg bzw. der

Zeitraum, der zur Energieumwandlung zur Verfügung steht, desto höher werden die auftretenden Kräfte sein!

Sturzbelastung Klettersteig

Besonders gut geeignet, um diese doch recht trockenen Grundlagen mit Leben zu erfüllen, ist das Beispiel Klettersteig. Hier sieht auf den ersten Blick alles sehr sicher und harmlos aus: Ein solides, fixes Drahtseil, alle paar Meter stabile Eisenstifte – da ist maximal ein kleiner Rutscher von ein paar Metern möglich, und dafür müsste ja wohl die zum Klettersteigset umfunktionierte 6 mm Reepschnur alle-mal reichen.

Die Wirklichkeit: Der Fangstoß, der

am Klettersteig ohne Verwendung einer Klettersteigbremse auftritt, gleicht einem Frontalzusammenstoß mit dem Auto! Bei einem 5 m-Sturz wird man auf einer Strecke von nur ca. 10 cm von 35 km/h auf Null abgebremst – einzige Knautschzone: der Körper des Kletterers.

Selbst wenn die gesamte Sicherungskette (Anseilgurt, Seilring, Reepschnur oder Bandschlinge mit Karabinern sowie die Metallbügel und das Drahtseil des Klettersteiges) den enormen Kräften standhält, kann es zu schweren, ja tödlichen Verletzungen kommen, da der menschliche Körper derartige Verzögerungen nicht schadlos übersteht.

Dass relativ wenig passiert, hängt in erster Linie damit zusammen, dass Unfallzahlen von zwei

Angelika Zak

Größen bestimmt werden: vom Risiko an sich und von der Zahl der Ereignisse - und Klettersteigstürze sind Gott sei Dank relativ selten. Andererseits boomt der Klettersteigbereich, immer steilere „Sportklettersteige“ werden eröffnet und von immer mehr Menschen begangen.

Wird ein Kletterer innerhalb von 10 cm von 30 km/h bis zum Stillstand abgebremst, so wirken dabei ca. 30 g, das Dreißigfache der Erdbeschleunigung, auf den Körper ein. Der Mensch kann kurzzeitig etwa das Zehnfache der Erdbeschleuni-

gung (= 10 g, eine Person mit 70 kg hat dann ein „Gewicht“ von 700 kg) unverletzt überstehen. Bei höheren Belastungen kommt es zu Knochenbrüchen und inneren Verletzungen sowie zu Kreislaufschäden bis hin zum Herzstillstand.

Ein Beispiel¹

Ein UIAA-genormter Klettersteigfreak mit einem Gewicht von 80 kg steigt auf einem Klettersteig von einer Seilverankerung 5 m senkrecht nach oben. Dabei speichert er potentielle Energie, und zwar:

$$E_{\text{pot}} = m \times g \times h = 80 \text{ kg} \times 9.81 \text{ m/s}^2 \times 5 \text{ m} = 3980 \text{ J (Joule)}$$

Unserem Beispiel zuliebe verliert er nun den Halt und damit rasch an Höhe. Seine Geschwindigkeit nimmt ab nun jede Sekunde um ca. 36 km/h zu! Nach 5 Metern Sturz verfängt sich der Karabiner seiner Selbstsicherung an der Seilverankerung. Die beim Aufstieg gewonnene potentielle Energie von 3980 J wurde während des Sturzes in 3980 J kinetische Energie umgewandelt². Die Fluggeschwindigkeit unseres Stuntman beträgt nach diesen 5 Metern 36 km/h.

Glücklicherweise ist unser Normkletterer auch vorschriftsmäßig mit genormter Ausrüstung unterwegs: Steinschlaghelm, Brust- und Sitzgurt, ein Klettersteigset

mit Seilweiche (Y-Form) und beide Karabiner im Drahtseil eingeklinkt.

Film ab: Der Seilstrang des Klettersteigsets beginnt sich zu spannen, dehnt sich und sowie eine Kraft von ca. 4000 N (400 kp) erreicht ist, beginnt Seil durch die Bremse zu rutschen. Die Kraft bleibt dadurch auf diesen Wert von 4 kN begrenzt – es wirken ca. 5 g, das fünffache der Erdanziehung, auf unseren Kletterer ein.

Aus Interesse rechnen wir nun aber noch den Bremsweg aus, d.h. wieviel Seil bei diesem Sturz durch die Klettersteigbremse („Fangstoßdämpfer“) rutschen wird:

$$\text{Bremsweg} = \frac{\text{Sturzenergie}}{\text{Bremskraft}} = \frac{3980 \text{ J}}{4000 \text{ N}} = \text{ca. } 1 \text{ m}$$

Kaum ist er - geschockt, aber unverletzt - zum Stillstand gekommen, ist er ganz froh, dass er sich für diese Saison das neue Klettersteigset geleistet hat.

Doch unser Klettersteigaspirant ist nicht nur ein beherzter Bergfex, sondern ein ebensolcher Physiker. Bevor er also - diesmal vorsichtiger - weiterklettert, malt er sich noch rasch aus, wie der Sturz mit seiner alten Ausrüstung - einer

7 mm-Reepschnur - ausgegangen wäre. Sturzhöhe und Sturzenergie wären selbstverständlich gleich geblieben, nur als Bremsweg wären ihm nur ca. 10 cm zur Verfügung gestanden, soweit sich halt Brustkorb, Oberschenkelmuskulatur und Reepschnüre verformen lassen.

Uns interessiert nun die Kraft, die bei diesem Sturz auftreten muss:

$$\text{Bremskraft} = \frac{\text{Sturzenergie}}{\text{Bremsweg}} = \frac{3980 \text{ J}}{0,1 \text{ m}} = \text{ca. } \frac{40.000 \text{ N}}{\text{bzw. } 4.000 \text{ kp}}$$

Kleine Sturzphysik – Formeln und Einheiten

$$E = F \times h$$

Energie = Kraft x Weg

Die Einheiten:

E ... [J], Joule, 1 J = Nm (Newtonmeter) = 1 kg m/s²

F ... [N], Newton, früher [kp]

h ... [m], Meter

$$E_{\text{pot}} = m \times g \times h$$

potentielle Energie = Masse x Erdbeschleunigung x Fallhöhe

Die Einheiten

m ... [kg], Masse

g ... [m/s²], Erdbeschleunigung = ca. 10 m/s²

$$E_{\text{kin}} = \frac{mv^2}{2}$$

kinetische Energie = Masse x Erdbeschleunigung x Fallhöhe

Die Einheiten

v ... [m/s], Geschwindigkeit

Noch einige interessante Formeln

Sturzeschwindigkeit (V in m/s!):

$$v = \sqrt{2gh}$$

Fallgeschwindigkeit nach (Luftreibung vernachlässigt):

- 5 m 35 km/h
- 10 m 50 km/h
- 20 m 71 km/h
- 40 m 100 km/h
- 80 m 142 km/h

Sturzdauer:

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}}$$

Man beachte: Die Sturzeschwindigkeit und damit auch die Sturzdauer sind unabhängig vom Gewicht des Kletterers!

Bei diesem Bremsweg von 10 cm tritt also eine Kraft von 4.000 kp (!!!) auf, das bedeutet weit oberhalb der Bruchfestigkeiten der allermeisten Sicherungsmittel - Berg Heil!

Selbst wenn die Sicherung überraschenderweise gehalten hätte (bei einer 7 mm-Reepschnur eine Illusion), würde unser Klettersteigfreund jetzt aller Wahrscheinlichkeit nach mit Knochenbrüchen und Schleuderverletzungen im Drahtseil hängen.

Schlussfolgerungen:

- Solange der Kletterer sich während des Bremsweges keine weiteren Verletzungen - z.B. durch Aufschlag am Felsen - zuzieht, führt jede Verlängerung des Bremsweges zu einer Verbesserung seiner Situation.
- Wird mit dynamischer Sicherung gearbeitet (Klettersteigbremse, HMS, dehnbare Seil), so bestimmen weder Gewicht des Kletterers oder dessen Sturzhöhe die Größe der auftretenden Kräfte, sondern nur die Dauer, mit der diese Kräfte auf den Kletterer und die Sicherungskette einwirken müssen, um den Sturz zum Stillstand zu bringen. Bei Verwendung einer Seilbremse kommt es bei großen Sturzhöhen zu mehr Seildurchlauf im Sicherungsgerät, die Bremskraft aber bleibt konstant und hängt (fast) nur von der verwendeten Ausrüstung und deren Bedienung ab.

Die Sicherungskette

Sie besteht aus allen Elementen der Sicherungsausrüstung. Im Falle eines gut ausgerüsteten Klettersteigkletterers somit aus Seilgurt, Seilring (evtl. Karabiner im Seilring), Klettersteigbremse, Seilstück mit Klettersteigkarabinern sowie aus den Metallbügeln und dem Stahlseil des Klettersteiges inkl. Verankerung. Wie für alle Ketten gilt auch hier:

die Sicherungskette ist nur so stark wie ihr schwächstes Glied. Es geht also darum, die Bruchlasten der einzelnen Elemente vernünftig aufeinander abzustimmen. Natürlich ist es technisch machbar, Karabiner mit Bruchlasten von 50 kN zu konstruieren - man müsste dann auch alle weiteren Elemente der Sicherungskette entsprechend verstärken - doch der Erfolg wäre gleich Null, da der menschliche Körper diesen Kräften nicht mehr standhalten kann.

Bei Verwendung einer Klettersteigbremse bleiben die auftretenden Kräfte unterhalb der Bruchlasten. Die schwächste Stelle ist hier ein quer oder auf Knick belasteter Karabiner (siehe untenstehende Tabelle). Besteht die Klettersteigsicherung nur aus einer Reepschnur, so ist diese eindeutig die Schwachstelle. Wenn man berücksichtigt, dass die Festigkeit einer Reepschnur durch einen Knoten um bis zu 40 % reduziert wird, so hält eine 6 mm-Reepschnur, die kurzfristig zu einer Klettersteigsicherung umfunktioniert wird, im Einzelstrang etwa einer Kraft von 5 - 6 kN stand.

Bruchlasten

Direkt mit dem Thema Sicherungskette verknüpft ist der Begriff Bruchlast (auch Bruchfestigkeit oder Reißfestigkeit). Die Bruchlast gibt an, bei welcher Kraft es zum Bruch bzw. Materialriss kommt. Die Bruchlast hängt stark von der Dauer der Krafteinwirkung ab und auch davon, ob die Belastung langsam gesteigert wird oder es zu einer kurzen, schlagartigen Kraftspitze kommt. Materialbruch ist in Zeiten genormter Ausrüstungsgegenstände und Produktionskontrolle bei sachgemäßer Verwendung der Ausrüstung heutzutage praktisch kein Thema mehr. Offene und auf Knick belastete

Karabiner, schlecht positionierte oder zu kleine Klemmkeile, Normalhaken, insbesondere jene aus den Anfängen des Alpinismus und einige „russische“ Eisschrauben, die sich aus budgetären Gründen hartnäckig im persönlichen Sicherungssortiment halten, sollten allerdings nicht unberücksichtigt bleiben.

Thema des 2. Teiles wird der Sturz ins Seil sein, vom Toprope-Sportklettern bis zum Sturz im Vorstieg. Welche Kräfte

treten an welchen Stellen auf - und - was kann durch richtigen Einsatz von Sicherungsmitteln zur Minimierung der Sturzfolgen getan werden?

Walter Fimml

Dr. Walter Fimml, 36, studierte Chemie und arbeitet derzeit an der Bundesanstalt für Lebensmitteluntersuchung in Innsbruck. Als Bergführer ist er seit vielen Jahren im Lehrteam des OeAV im Einsatz.

Michael Larcher

Michael Larcher, 40, ist Alpenverein-Ausbildungsleiter

1 Die Zahlenbeispiele gelten nur für kleine Sturzhöhen bzw. Geschwindigkeiten, für die der Luftwiderstand vernachlässigt werden kann. Weiters wird eine konstante Bremskraft während des ganzen Bremsweges angenommen. Auch die während des Bremsvorganges zurückgelegte Höhe von 1 bzw. 0,1 Meter wurde nicht in die Sturzhöhe bzw. die Sturzenergie eingerechnet

2 Vielleicht etwas überraschend: Aber die Energiemenge in Form von Wärme würde gerade ausreichen, um einen knappen Liter Bergsteigertee um 1°C zu erwärmen (1 Kilokalorie [Kcal] entspricht 4187 Joule und erwärmt einen Liter Wasser um 1°C)

Bruchfestigkeiten:

	übliche Werte bei Zerreißversuchen	Mindestanforderung nach Norm
Einfachseil, 10-11 mm	> 30 kN	nicht genormt
Halbseil, 9 mm	> 30 kN	nicht genormt
Reepschnur, 4 mm		3,2 kN
Reepschnur, 5 mm		5,0 kN
Reepschnur, 6 mm	ca. 8 kN	7,2 kN
Reepschnur, 6 mm mit Sackstich	ca. 5 kN	
Reepschnur, 7 mm		9,8 kN
Reepschnur, 8 mm	14-16 kN	12,8 kN
Bandschlinge	15-25 kN	5 kN je Kennfaden
Karabiner, in Längsrichtung	22-24 kN	20 kN
Karabiner, in Querrichtung	7-10 kN	7 kN
Karabiner, auf Knick	nicht bekannt	nicht genormt
Karabiner, Schnapper offen, in Längsrichtung	7-10 kN	7 kN
Klettersteigbremse (Fangstoßdämpfer)	nicht bekannt	9 kN
Klettergurt	>	16 bzw. 10 kN

Je kürzer der Bremsweg bzw. der Zeitraum, der zur Energieumwandlung zur Verfügung steht, desto höher werden die auftretenden Kräfte sein!