

# Energie ist Kraft mal Weg

## Sicherungstheoretische Grundlagen, Teil 2

von Walter Fimml und Michael Larcher

In der letzten Ausgabe wurden die wichtigsten physikalischen Grundlagen eines Sturzes am Beispiel Klettersteig erklärt. Im vorliegenden zweiten Teil werden Stürze unter Verwendung eines Kletterseiles - vom Sturz im Nachstieg über den fast selbstverständlichen Sprung ins Seil beim Sportklettern bis zum Sturz bei alpinen Felstouren unter die physikalische Lupe genommen<sup>1</sup>. Anhand von zunehmend komplexeren „Modellstürzen“ sollen die theoretischen Zusammenhänge erklärt werden. Anschließend wird anhand realer Klettersituationen versucht, die Praxis nicht aus den Augen zu verlieren: Welches Sicherungsgerät sollte verwendet werden? Wie stark werden Standplatz und Sicherung belastet? Warum ist viel Seilreibung gefährlich?

### Grundlagen

#### Der Sturfaktor

Ein Begriff, der in den meisten Kletterhimen herumgeistert und selten wirklich verstanden wird, ist der „Sturfaktor“. Diese dimensionslose Zahl gibt Auskunft über das Verhältnis von Sturzhöhe zur abgegebenen Seillänge. Die Rechnung ist also einfach und auch jenen zuzumuten, die in Mathe nicht zu den Glanzlichtern gehören: Man dividiert die Sturzhöhe durch die Länge des abgegebenen Seils!

Der Sturfaktor erlaubt somit eine grundsätzliche Aussage über die „Härte“ eines Sturzes. Es ist einleuchtend, dass es einen Unterschied macht, ob ich 10 m stürze und dabei 20 m Seil abgegeben wurden (Sturz nach 20 Metern mit einer Zwischensicherung nach 15 Metern) oder ob bei diesem Sturz nur 10 Meter Seil zur Verfügung stehen (Sturz nach 5 Metern ohne Zwischensicherung). Im ersten Fall steht mehr dehnbare Seil zur Verfügung, der Sturz ist grundsätzlich „weicher“.

Der Sturfaktor kann Werte zwischen 0 - Sturz bei gespannten Seil im Nachstieg - und 2<sup>2</sup> - Sturz des Vorsteigers ohne Zwischensicherung in den Stand, egal aus welcher Höhe - ergeben. Eine häufig übersehene Ausnahme bildet der Klettersteig: Hier sind auch wesentlich höhere Sturfaktoren möglich, eine Klettersteigbremse (= Fangstoßdämpfer) ist daher äußerst sinnvoll.

#### Fangstosskraft

Die Kraft, die im Moment der maximalen Seildehnung auftritt, bezeichnet man als Fangstosskraft. Der Fangstosskraft. Der Fangstosskraft ist keine Konstante, er hängt vom Sturfaktor und vom Gewicht des Kletterers, weniger von der Sturzhöhe ab. Bei kleinen Sturfaktoren (0,2 - 0,4) wird der Gewichtseinfluss zunehmend geringer (siehe nebenstehende Grafik).

Kletterseile müssen so konstruiert sein, dass bei einem Normsturz (80 kg Eisenmasse, Sturfaktor 1,7) keine Kräfte über 12 kN auftreten. Typische Werte liegen im Bereich von 8,5 bis 9,5 kN. Spezi-

elle Sportkletterseile wie etwa das „Salewa Indoor“ mit einem Fangstoss von nur 6,8 kN sind zum weichen Abfedern vieler kleiner Stürze konstruiert, aber eher ungeeignet für große Sturzhöhen oder um einem Nachsteiger „Zug“ zu geben.

#### Seildehnung

Kletterseile sind „Energieseile“, das heißt, sie können durch Dehnung Sturzenergie aufnehmen. Belastet man ein Bergseil, so dehnt es sich und zwar umso mehr, je länger und weicher das Seil und je größer die Kraft ist (siehe Formeln S. 17).

Bei der Seildehnung unterscheidet man zwischen der „Gebrauchsdehnung“ und der „Fangstoßdehnung“.

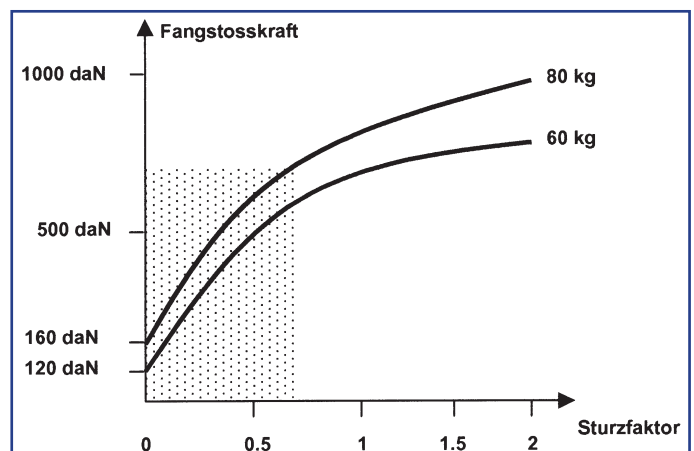
Die Gebrauchsdehnung ist jene Seilverlängerung, die beim bloßen Hängen im Seil auftritt. Jeder Kletterer erlebt sie beim Abseilen oder – unangenehm – beim Hineinrutschen im Nachstieg. Die maximale Gebrauchsdehnung wird von der Norm festgelegt. Sie fordert eine maximale Dehnung von 10 % bei einer Belastung mit 80 kg. Ein 50 m-Seil kann sich demnach um maximal 5 m dehnen, typische Seilwerte liegen bei 7 %. Die Fangstoßdehnung eines Seiles ist die Dehnung des Seiles im Falle eines Sturzes.

Sie beträgt bei einem Normsturz je nach Seilmodell und Höhe des Fangstoßes etwa 25 %.

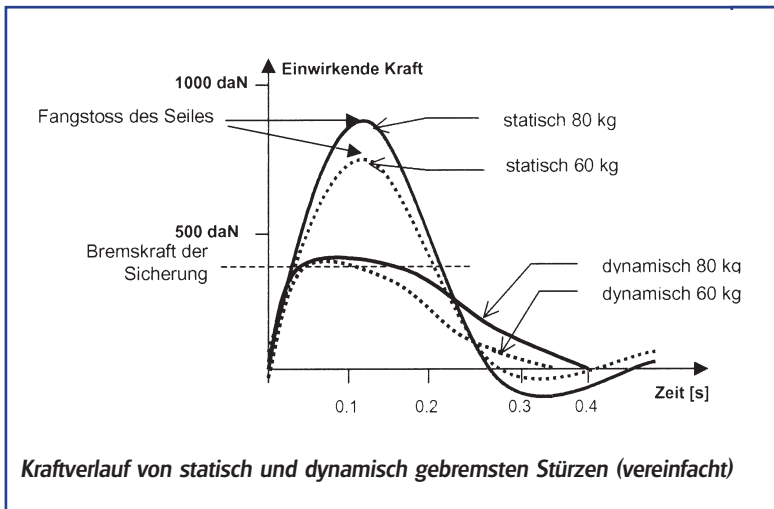
In einigen Bergsportbereichen ist Dehnung unerwünscht, und hier verwendet man sogenannte Kraftseile. Diese dehnen sich kaum und würden auch schon

1 Einschränkungen: Die Zahlen stellen Durchschnittswerte dar, die bei Versuchen ermittelt wurden. Jedes Seil ist anders, ein Seil verhält sich beim zweiten Sturz anders als beim ersten, Sturzexperimente mit starren Fallgewichten lassen sich nicht 1:1 auf Versuche mit Menschen umlegen, Abseilachter unterschiedlicher Größe und Form, Felsreibung, die nicht genommene Fingerkraft der Bremshand machen jeden Sturz zu einem individuellen Experiment. Damit die mathematischen Modelle nicht ausufern, werden Vereinfachungen gemacht, die aber keine grundlegende Auswirkungen auf das Endresultat haben. Das Festziehen der Knoten, die Seildehnung des Bremsdurchlaufs, das Nachfedern usw. werden vernachlässigt, die Bremskraft von Sicherungsgerät und Bremshand wird als konstant angesehen, das Kletterseil als lineare Feder beschrieben usw. . . .

2 In der Praxis wird dieser Wert allerdings nie erreicht, da auch bei sehr aufmerksamer Sicherung immer ein wenig Schlappseil besteht. Ein Sturfaktor von max. ca. 1,8 ist somit beim Klettern in Seilschaften eine realistische Größe.



**Fangstoss, Sturfaktor und Körpergewicht:** Fangstosskraft [in kN] eines Kletterseiles bei statischer Sicherung in Abhängigkeit von Sturfaktor und Gewicht des Gestürzten (schematisch). In der Praxis (punktierter Bereich), bei Verwendung dynamischer Sicherungsgeräte, sind je nach Seilverlauf max. Kräfte bis ca. 700 daN möglich.



bei einem kleinen Vorstiegssturz zu extremen Fangstoßkräften bzw. zu Materialbrüchen und Verletzungen führen. Reepschnüre, Höhlenseile, Bandschlingen und Stahlseile gehören zur Familie der Kraftseile. Also Achtung: Die Verwendung etwas dickerer Reepschnüre als Seilersatz hätte bei einem Sturz fatale Folgen!

**Der „g“-Wert**

Da die Belastbarkeit des menschlichen Körpers etwa proportional zu seinem Gewicht ist, ist der „g“-Wert, der angibt, dem Wievielfachen des Körpergewichtes eine bestimmte Kraft entspricht, wesentlich aussagekräftiger als die Angabe einer bestimmten Kraft in kN.

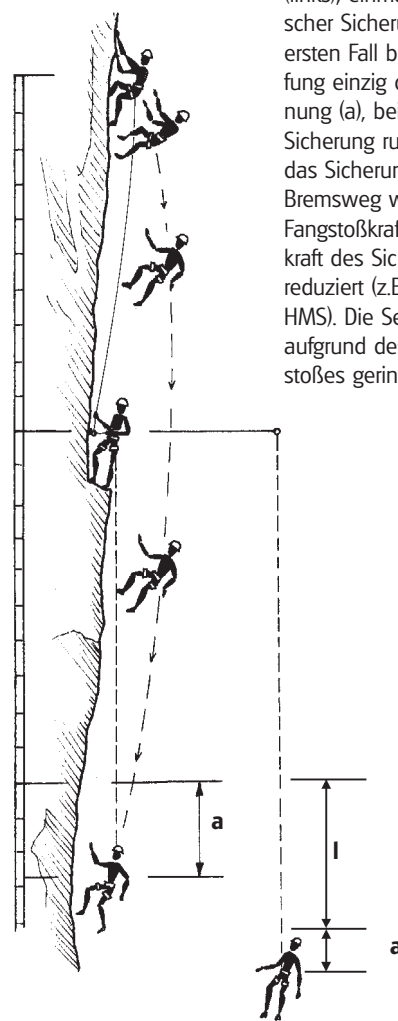
**g-Wert = Kraft / Gewicht**

Im Klettersport bedeutet dies, dass bei einer vorgegebenen Bremskraft eines Sicherungsgerätes (oder z.B. einer Klettersteigbremse) ein schwerer Kletterer mit weniger „g“ belastet wird als ein leichter Kletterer, dafür aber über einen längeren Zeitraum, d.h. es wird beim Schwergewicht zu mehr Seildurchlauf im Sicherungsgerät kommen. Eine Fangstoßkraft von 600 daN (ca. 600 kp) zum Beispiel entspricht bei einem Kletterer mit einer Masse von 80 kg ca. 7,5 g, bei einem 60 kg schweren Kletterer jedoch 10 g. Für Belastungszeiten unter 0,5 Sekunden werden heute 20 g als Belastungsgrenze beim Sturz ins Seil mit aufrechter Körperhaltung angesehen. Dieser Wert ist für

unseren Bereich relevant, da wir es beim Sturz ins Seil mit Belastungszeiten in dieser Größenordnung zu tun haben (ca 0,5 - 1 sec.; Fangstoßspitze 0,1 - 0,2 sec.) Bei Belastungszeiten von 30 bis 60 Sekunden treten bereits bei 8-12 g Schwindel und Störungen der Sinneswahrnehmung auf. Fazit: Bei kontrollierten Stürzen hält der Körper den Belastungen eines typischen Sturzes gut stand. Bei kleineren Sturzhöhen „schluckt“ bereits die Verformung des Körpers ca. 20 - 40 % der Sturzenergie. Hier unterscheiden sich Sturzexperimente mit Eisengewichten deutlich von Stürzen eines Menschen. Aufgrund der Reaktionszeit der Muskulatur (ca. 0,08 Sekunden) ist weniger die absolute Fangstoßkraft als vielmehr die Geschwindigkeit des Kraftanstieges ausschlaggebend.

**Die Belastung der Sicherungskette**

Wird ein Teil der Sicherungskette - bestehend aus Anseilgurt, Anseilknoten, Seil, Zwischenicherungen, Standplatz - zunehmend belastet, so kann er sich starr verhalten - wie etwa eine Expressschlinge oder sich bewegen, verformen oder brechen. Nur im zweiten Fall wird Sturzenergie abgebaut. Bei dynamischen Sicherungsgeräten kommt es nach dem Erreichen einer bestimmten Kraft zu einem Seildurchlauf, der so lange anhält, bis die Sturzenergie durch Reibung und Verformung des Seiles abgebaut ist. Die Bremskraft der unterschiedlichen



Sturz in den Stand (SF=2), einmal statisch gesichert (links), einmal mit dynamischer Sicherung (rechts): Im ersten Fall besteht die Dämpfung einzig durch die Seildehnung (a), bei dynamischer Sicherung rutscht Seil durch das Sicherungsgerät (l), der Bremsweg wird verlängert, die Fangstoßkraft auf die Bremskraft des Sicherungsgerätes reduziert (z.B. ca. 350 daN bei HMS). Die Seildehnung wird aufgrund des geringeren Fangstoßes geringer.

Sicherungsgeräte hängt im wesentlichen von Fabrikat, Belastungsrichtung, Seildurchmesser und Kraft der Bremshand ab.

**Der Sturz ins Seil**

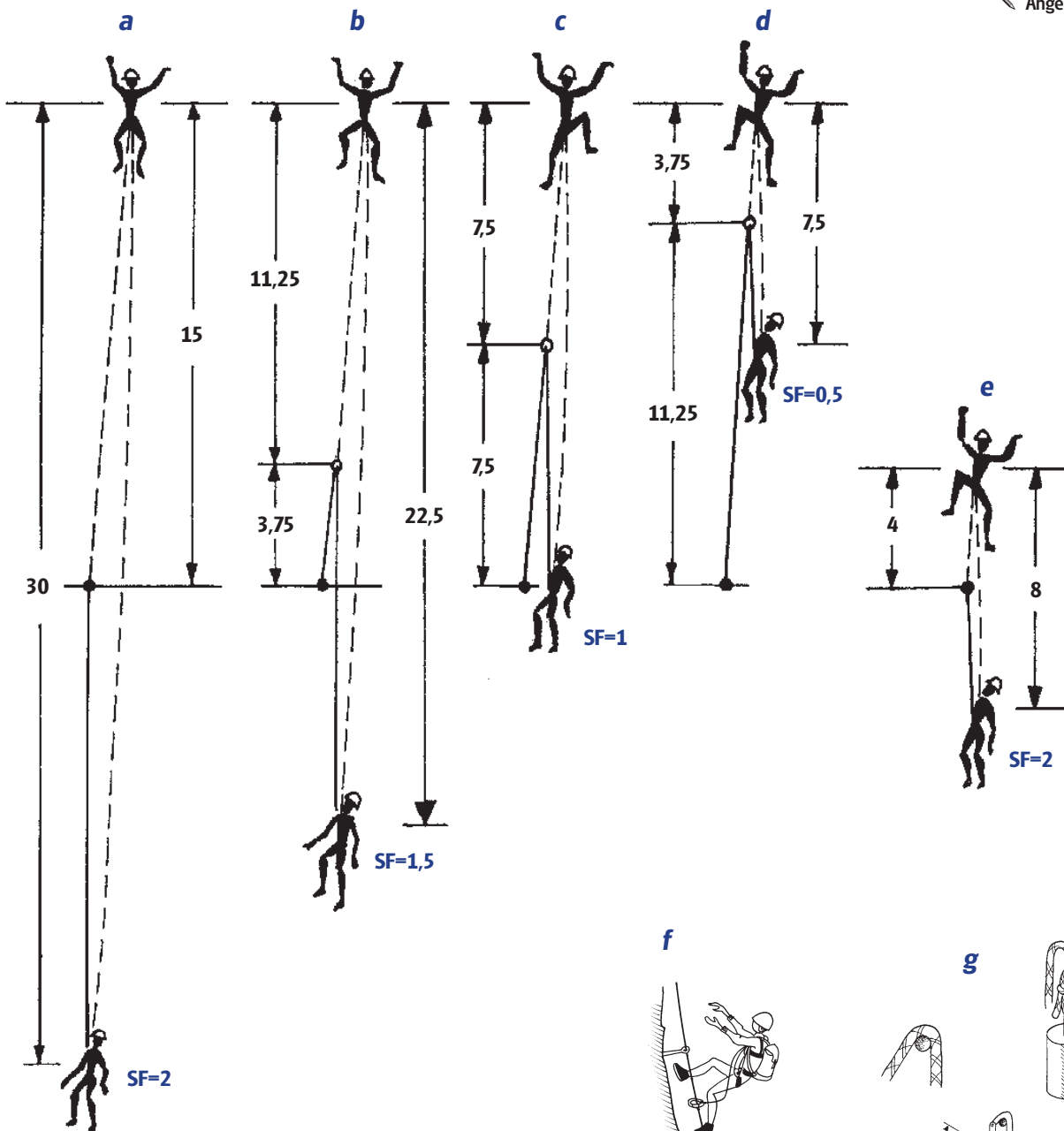
**Situation 1: Sturz in ein fixiertes Seil (statische Sicherung)**

Solche - eher seltene - Situationen können bei Verwendung eines Grigri als Standplatzsicherung auftreten, aber auch, wenn

die HMS-Sicherung abgeklemmt wird und ihre dynamische Wirkungsweise nicht entfalten kann. Auch zu geringe Seilreserve kann zu beinahe statischer Sicherung führen. Gewarnt sei hier auch vor einem senkrechten Bungee-Sprung in ein fixiertes Kletterseil! Das Seil spannt sich, dehnt sich und die Kraft erreicht je nach Seiltyp und Körpergewicht den Fangstoßwert des Seiles so im Bereich 600 - 1200 daN. Bei einem statisch abgefangenen

**Typische Bremskraftwerte:**

- HMS:** 3,5 kN bei Zug nach unten, 2,7 kN bei Zug nach oben
- Abseilachter:** 1,3 - 1,5 kN bei Zug nach unten, 2 - 2,5 kN bei Zug nach oben
- Grigri:** ca. 7-9 kN, d.h. statisch (unter realer Sturzbelastung; bei langsamen Zug wurden Werte zwischen 3,8 - 5,5 kN ermittelt)

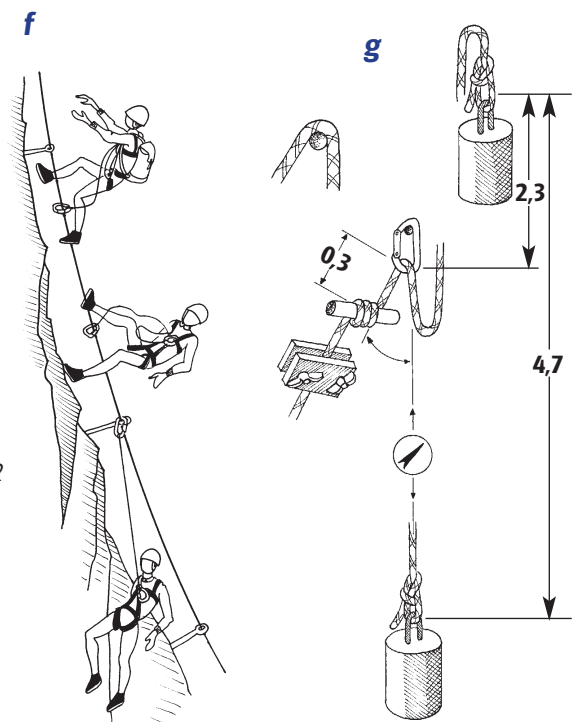


### Beispiele verschiedener Sturzfaktoren:

- a) Sturz in den Stand:  $SF = 30 \text{ m} / 15 \text{ m} = 2$   
 b) Zwischensicherung nach 3,75 m:  $SF = 22,5 \text{ m} / 15 \text{ m} = 1,5$   
 c) Zwischensicherung nach 7,5 m:  $SF = 15 \text{ m} / 15 \text{ m} = 1$   
 d) Zwischensicherung nach 11,25 m:  $SF = 7,5 \text{ m} / 15 \text{ m} = 0,5$   
 e) Sturz in den Stand, diesmal aus einer Höhe von „nur“ 4 m:  $SF = 8 \text{ m} / 4 \text{ m} = 2$

Der Vergleich von a) und e) macht deutlich, dass extrem unterschiedliche Sturzhöhen den selben Sturzfaktor ergeben können. Oder umgekehrt: die gleiche Sturzhöhe kann zu völlig unterschiedlichen Sturzfaktoren führen.

- f) Klettersteigsturz, 5 m, Länge der Selbstsicherung ca. 1 m:  $SF = 5 \text{ m} / 1 \text{ m} = 5!$   
 g) Sturzfaktor bei Normsturz auf der Fallprüfanlage (schematische Darstellung):  
 $SF = 4,7 \text{ m} / 2,7 \text{ m} = 1,8$



Sturz besteht Verletzungsgefahr für den Gestürzten, da die Belastung in den Bereich jenseits der 10 g kommt und damit in einen Bereich, der für den Menschen gefährlich wird. Auch Normalhaken und nicht optimal gelegte Klemmkeile kommen hier an ihre Grenzen.

Die Energiebilanz ist hier relativ einfach: Die Sturzenergie muss mangels Bremsgerät vom Seil und vom Körper als Dehnungs- und Verformungsarbeit aufgenommen werden.

Daran wird man kaum während des Sturzes denken, bemerkenswert ist aber, dass die Fangstoßkraft bei einem statischen Sturz außer vom Gewicht des Kletterers - an dem außer mit langfristigen Diäten wenig zu ändern ist - und der Seilfederkonstante (k) vom Sturfaktor abhängig ist und nicht von der Sturzhöhe: Bei statischer Sicherung führt ein 40 Meter Sturz in den Stand zur gleichen Fangstoßkraft wie ein 10 m Sturz! Bei Sturfaktor 0 (Nachstieg ohne Schlappseil) erhält man eine Belastung mit dem doppelten Körpergewicht. Diese Fangstoßkraft wirkt auf den Körper und auf die Verankerung, das Seil dehnt sich dabei um ca. 25 %.

### Situation 2: Sturz in den Stand mit dynamischer Sicherung

Hier treten die Seileigenschaften in den Hintergrund, die Härte des Sturzes wird in erster Linie von der Bremskraft des gewählten Sicherungsgerätes bestimmt. Vielleicht überraschend: Obwohl es sich um einen Sturz mit Sturfaktor 2 handelt, ist der Sturz für den Gestürzten eher „weich“, und auch der Standplatz wird deutlich weniger belastet als etwa eine Zwischensicherung.

Bei Verwendung einer HMS wirken auf den Gestürzten ca. 350 daN, also ca. 1/3 der Kraft bei statischer Sicherung. Auf den Standplatz wirken noch zusätzlich die Bremskraft der Bremshand (ca. 40 daN) und allenfalls noch das Gewicht des Sichernden, falls dieser frei im Standplatz hängt (ca. 80 daN), in Summe also max. ca. 470 daN. Mit einer vernünftigen Ausgleichsverankerung (Kräftedreieck) an zwei Haken

wird jeder Haken mit etwa 250 - 300 daN belastet.

Gefährlich wird ein solcher Sturz bei Verwendung von Sicherungsgeräten mit dem „F2-Problem“ wie etwa dem Abseilachter oder - noch dramatischer - mit den „Saurüssel“-Sicherungsgeräten (ATS, VC, Tuber, etc.). Der Gestürzte und der Stand werden durch diese Geräte zwar weniger belastet, die geringe Bremskraft allerdings führt zu einem größeren Seildurchlauf, wodurch das Risiko, sich die Hände zu verbrennen und als Folge das Seil loszulassen, steigt.

### Situation 3: Sturz in eine Zwischensicherung

Bei einem Sturz steigt die Zugkraft so lange an, bis auf der Seite des Bremsgerätes dessen Bremskraft erreicht wird. Dann beginnt das Seil durch das Sicherungsgerät zu rutschen und bringt den Kletterer mit annähernd konstanter Kraft zum Stillstand.

Der Gestürzte wird mit ca. dem 1,7-fachen der Bremskraft des Sicherungsgerätes belastet, die Zwischensicherung mit ca. dem 2,7-fachen.

Das sind bei Verwendung eines HMS ca. 430 daN (250 x 1,7), bei einem Abseilachter 340 daN (200 x 1,7) für den gestürzten, 680 daN bzw. 540 daN für die Zwischensicherung (Bremskraft hier jeweils für Zugrichtung nach oben).

Bei ungünstigem Seilverlauf stöhnt der Vorsteiger nicht nur wegen der hohen Seilreibung beim Klettern, er fällt im Falle des Falles auch härter und die letzte Zwischensicherung wird höher belastet. Denn bis zum Standplatz eine Kraft von 250 daN „durchkommt“, um die dynamische Sicherung auszulösen, muss an der Umlenkung mit wesentlich höherer Kraft gezogen werden, und nach der Umlenkung auf der Seite des Kletterers kommen dann nochmals 70 % dieser Kraft dazu.

Der Sturz wird vom Sichernden am Standplatz kaum wahrgenommen und statisch gehalten, obwohl die Belastung für den

## Sturzphysik für Anspruchsvolle

### Energie, Kraft, Bremsweg

Der Titel unserer Serie - „Energie = Kraft x Weg“ - gilt leider nur dann, wenn die Kraft während des gesamten Weges gleich bleibt - wie etwa beim Seildurchlauf durch ein Sicherungsgerät. Wird z.B. mit zunehmender Dehnung eines Seiles die Zugkraft immer größer, berechnet man die Energie als Integral

$$E = \int_0^s F ds$$

Steigt die Kraft linear mit dem Weg - also  $F = k \times s$ , so erhält man für dieses Integral:

$$E = \frac{ks^2}{2}$$

Bleibt die Kraft

entlang des Weges konstant, ergibt sich:

$$E = F \times s$$

### Seildehnung

$a = F \times k \times L$  oder umgeformt:  $E = \frac{a}{kL}$

a ... Seildehnung in m

F ... Kraft in N

L ... Länge des belasteten Seilstückes in m

k ... Elastizitätskonstante des Seiles (Federkonstante), ca. 0.00017 bis 0.000023 N-1

Ein Wert für k kann abgeschätzt werden, wenn man für einen Normsturz die Kraft mit ca. 10 kN, und die Seildehnung mit 20 % ansetzt, also  $a/L=0.2$

Die Energie, die dabei aufgenommen wird, kann nach obiger Formel berechnet werden

$$E = \int_0^a \frac{a}{kL} da = \frac{a^2}{2kL}$$

### Fangstoß

$$E_{\text{sturz}} = E_{\text{Dehnung}} + E_{\text{deform}}$$

Lässt man die Körperdeformation  $E_{\text{deform}}$  außer Acht, erhält man bei a Metern Seildehnung

$$\frac{a^2}{2kL} = mg(h+a)$$

und für die Kraft die im Moment maximaler Seildehnung auftritt:

$$F_{\text{max}} = mg + \sqrt{m^2g^2 + \frac{2mg}{k} \times \frac{h}{L}}$$

Bei Sturfaktor 0 ( $h/L = 0$ ; Nachstieg ohne Schlappseil) erhält man:

$$F = mg + mg = 2mg$$

d.h. eine Belastung mit dem doppelten Körpergewicht.

### Pendelsturz

Die Zentrifugalkraft kann aus Masse, Geschwindigkeit und Radius berechnet werden:

$$F = \frac{mv^2}{r}$$

Die Geschwindigkeit ist abhängig von der Fallhöhe: Bei einem 90° Pendler ist der Radius r gleich der Sturzhöhe h

$$v = \sqrt{2gh} \quad F = \frac{2mgh}{h} = 2mg \quad \text{also das doppelte Körpergewicht}$$

Gleichzeitig mit der Fliehkraft wirkt noch die Gravitation ( $F = mg$ ) - das ergibt in Summe - egal ob 1m oder 20m Pendelsturz! - eine Belastung mit dem **3-fachen Körpergewicht**.

Vorstieger und die Zwischensicherung am größten ist.

*Fazit: Geringe Seilreibung schont den Gestürzten und die Sicherungskette!*

#### Situation 4: Sturz beim Toprope-Klettern

Die auftretenden Kräfte sind hier relativ gering und liegen für den Kletterer, wenn nicht von einem unaufmerksamen „Sichernden“ zu viel Schlappseil gelassen wurde, im Bereich des zwei- bis dreifachen Körperwichtes (160 - 240 daN).

Der Sichernde wird maximal mit etwa 90 - 140 daN nach oben gezogen, und kann aus dem Stand gehoben werden.

Speziell bei abschüssigem Untergrund (Pendler!) oder unerfahrenen Sichernden kann dies zum Problem werden kann, wenn im Schreck das Bremsseil ausgelassen wird.

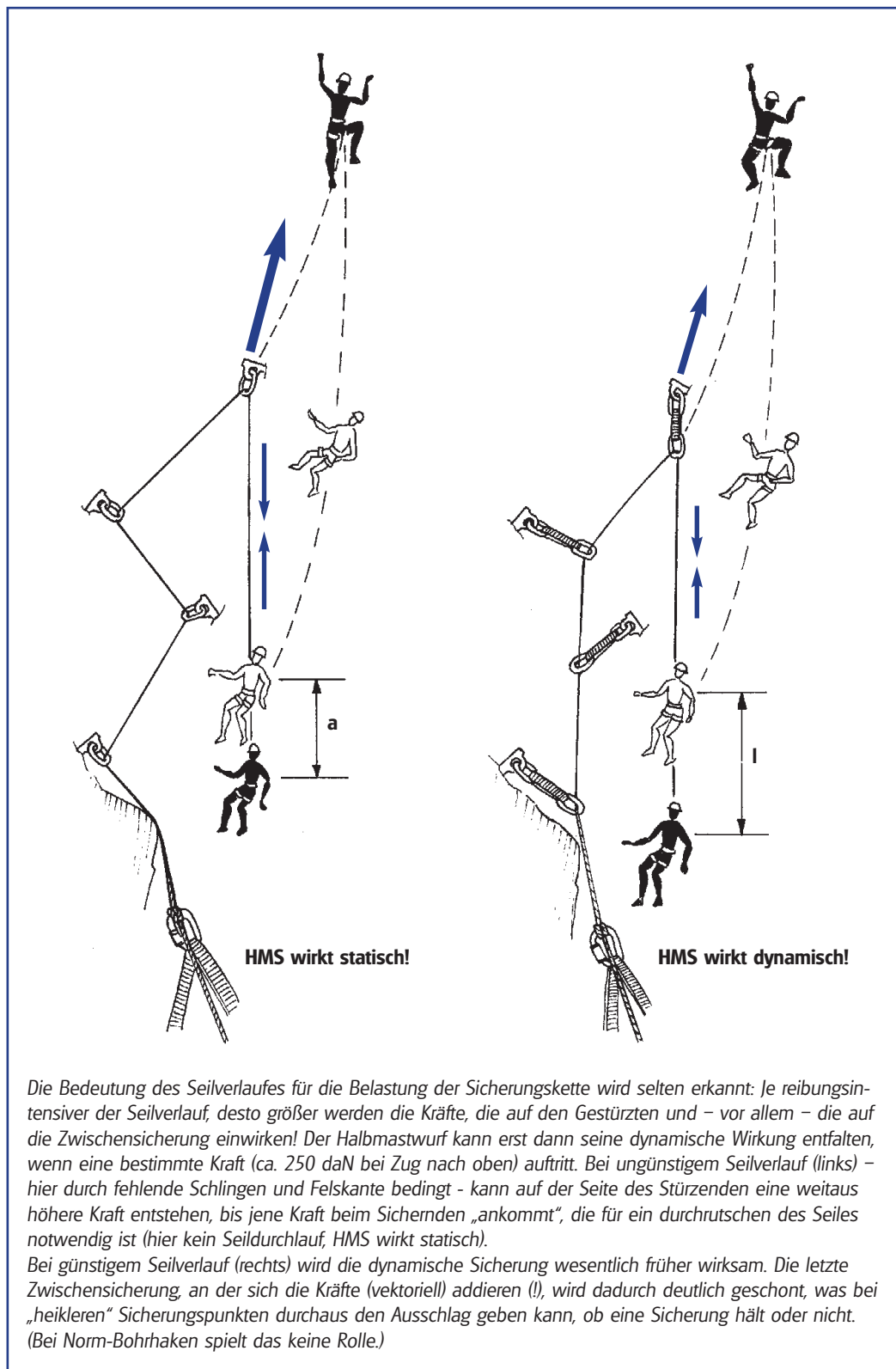
Auf die Umlenkung wirkt die Summe der beiden Kräfte - also 220 bis 330 daN - kein Problem für Umlenkungen und Karabiner in Klettergärten und -hallen.

Alle üblichen Sicherungsgeräte wirken hier bei normaler Handhabung statisch, d.h. sie haben Bremskraftwerte größer als die 90 daN. Zum Ablassen muss die Bremshand dosiert Seil eingeben oder durchlaufen lassen.

Neben Fehlbedienungen von Sicherungsgeräten (Grigri, keine Hand am Bremsseil, Griff zum Lastseil) sind ein freies Seilende (Knoten ins Seilende) und die Verwendung einer Reepschnur oder Bandschlinge als Umlenkung die größten Gefahren beim Toprope-Klettern.

#### Situation 5: Sportklettern

Beim Sportklettern ist die Situation allgemein günstig. Mit jeder eingehängten Zwischensicherung wird das Verhältnis von ausgegebenem Seil zu Sturzhöhe (= Sturzfaktor) kleiner und damit besser. Ideal sind kurze Hakenabstände speziell auf den ersten Klettermetern, nicht nur wegen der Gefahr einer Bodenlandung, sondern auch um den Sturzfaktor rasch zu verringern. (Ein 4m-Sturz nach 12 Klettermetern führt zu



Die Bedeutung des Seilverlaufes für die Belastung der Sicherungskette wird selten erkannt: Je reibungsintensiver der Seilverlauf, desto größer werden die Kräfte, die auf den Gestürzten und – vor allem – die auf die Zwischensicherung einwirken! Der Halbmastwurf kann erst dann seine dynamische Wirkung entfalten, wenn eine bestimmte Kraft (ca. 250 daN bei Zug nach oben) auftritt. Bei ungünstigem Seilverlauf (links) – hier durch fehlende Schlingen und Felskante bedingt – kann auf der Seite des Stürzenden eine weitaus höhere Kraft entstehen, bis jene Kraft beim Sichernden „ankommt“, die für ein durchrutschen des Seiles notwendig ist (hier kein Seildurchlauf, HMS wirkt statisch).

Bei günstigem Seilverlauf (rechts) wird die dynamische Sicherung wesentlich früher wirksam. Die letzte Zwischensicherung, an der sich die Kräfte (vektoriell) addieren (!), wird dadurch deutlich geschont, was bei „heikleren“ Sicherungspunkten durchaus den Ausschlag geben kann, ob eine Sicherung hält oder nicht. (Bei Norm-Bohrhaken spielt das keine Rolle.)

Sturzfaktor 0,33, ein 4 m-Sturz nach 20 Klettermetern nur zu Sturzfaktor 0,2).

Beim Sportklettern liegt der Sturzfaktor meist im Bereich 0,1 - 0,4, die freie Sturzhöhe im Bereich 1 - 4 m, die Kraft die auf den

Körper wirkt, im Bereich 200 - 400 daN oder 2,5 - 6 g.

Bei Verwendung von statischen Sicherungsgeräten (Grigri) sollte das Halten eines Sturzes an einer überhängenden Wand geübt werden. Speziell bei Pendelstürzen oberhalb von Dachkanten ist ein

dosiertes Nachspringen des Sichernden für den Gestürzten sehr angenehm.

#### Situation 6: Klettern-Alpin

Charakteristik: Mehrere Seillängen, größere Sturzhöhen und Sturzfaktoren bis 0,7 sind möglich, die

Haltekraft der Sicherungspunkte ist nicht immer eindeutig, geländebedingt kann es auch in kurzen Seillängen zu hoher Seilreibung kommen. Die Partnersicherung erfolgt zumeist über einen Fixpunkt (Standplatz, HMS).

Der vom Gefühl her unangenehmste Fall - der Sturz in den Standplatz ohne Zwischensicherung, sieht - bei Verwendung einer dynamischen Sicherung - physikalisch gesehen gar nicht so übel aus: Der Kletterer wird nur mit etwa 300 - 400 daN belastet, treten höhere Kräfte auf, so beginnt das Seil im HMS durchzurutschen.

Was nicht hält, das bremst - denkt man sich gelegentlich, wenn man irgendeine Rostgurke als Zwischensicherung einhängt. Das stimmt auch, denn bis die Bruchkraft eines Hakens oder Klemmkeils erreicht wird, muss sich das Seil auf beiden Seiten der Zwischensicherung dehnen und dabei wird Energie abgebaut - bei Bruch fällt man dann ungebremst weiter, bis sich das Seil in der nächsten Zwischensicherung wieder spannt, dehnt usw. Der tatsächliche Nutzeffekt ist allerdings ziemlich gering.

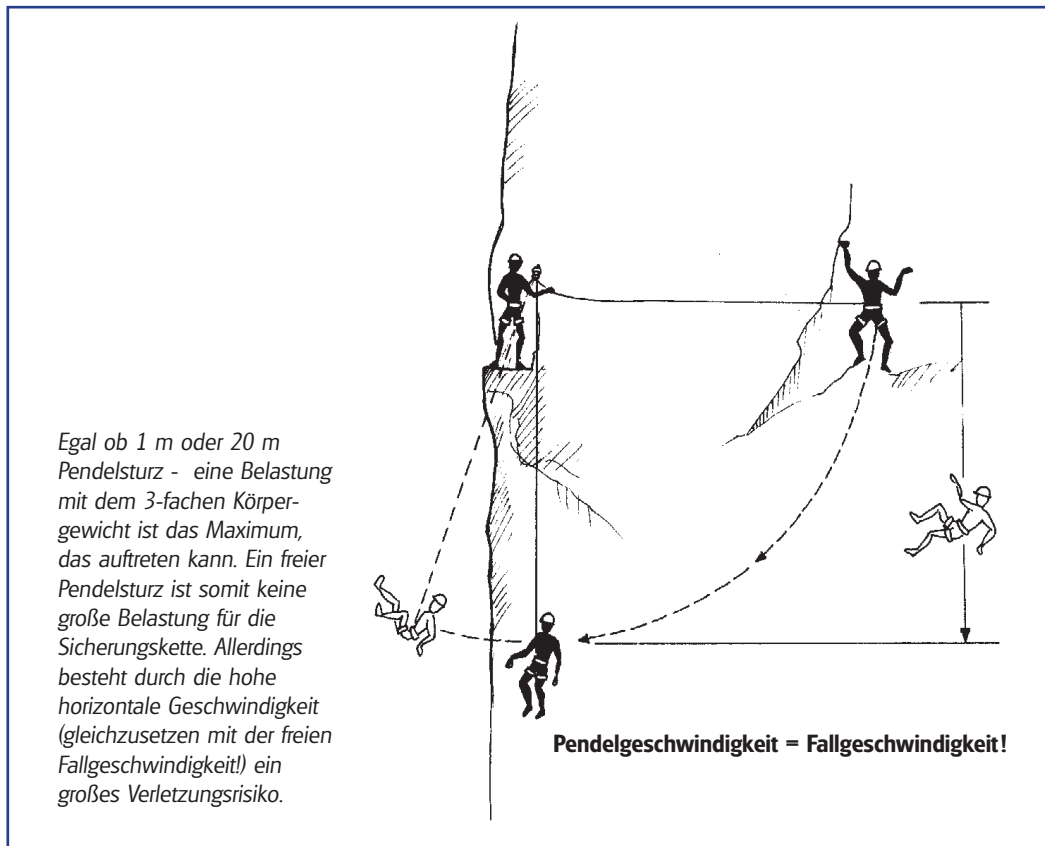
*Ein Beispiel<sup>3</sup>:*

Ein Haken 10 m oberhalb des Standplatzes hält 500 kp. Nach 15 m kommt es zum Sturz. Der 5m-Seilabschnitt zum Gestürzten wird dann mit ca. 315 kp, der 10 m-Seilabschnitt zum Standplatz mit ca. 185 kp belastet - der Haken bricht, bevor die HMS mit 250 N belastet werden konnte.

Die Sturzenergie nach 10 m beträgt, 8000 Nm, für die Seildehnung (siehe Formeln S.17 ) erhält man 0,40 m auf der Seite des Gestürzten und 0,46 m auf Seite der Sicherung.

In Summe sind das 1065 Nm oder ca. 13 % der Sturzenergie des Kletterers - nicht gerade phantastisch - denn jetzt geht's weitere 20 m nach unten und weitere 16.000 Nm Sturzenergie kommen hinzu!

Schlussfolgerung: In das „Reißverschlussprinzip“ sollte man beim Klettern nicht allzu große Erwartungen stecken, lieber eine Rostgurke



*Egal ob 1 m oder 20 m Pendelsturz - eine Belastung mit dem 3-fachen Körpergewicht ist das Maximum, das auftreten kann. Ein freier Pendelsturz ist somit keine große Belastung für die Sicherungskette. Allerdings besteht durch die hohe horizontale Geschwindigkeit (gleichzusetzen mit der freien Fallgeschwindigkeit!) ein großes Verletzungsrisiko.*

**Pendelgeschwindigkeit = Fallgeschwindigkeit!**

durch solide Klemmkeile ersetzen – oder auch mal einen Haken schlagen (wer kann das noch?).

**Situation 7: Sturz im Nachstieg und passives Abseilen**

Der Sturfaktor bei straffem Seil = 0, Kräfte bis max. zum doppelten des Körpergewichts (ca. 160 daN) sind zu erwarten. Mit einem dünnen, neuen Seil und Verwendung eines Abseilachters kann aber auch das Nachsichern oder Ablassen bereits Stress verursachen und die vom Sichern verkrampften Hände werden in der nächsten Seillänge den Vorstieg nicht gerade erleichtern. Bei unaufmerksamer „Sicherung“ (Schlappseil, keine Hand am Bremsseil) oder bei Pendelstürzen in Quergängen haben sich auch hier schon Unfälle ereignet, die im günstigeren Fall mit Verbrennungen des Sichernden, im schlimmsten Fall mit dem Tod des Nachsteigenden endeten.

Schlussfolgerung: Auch beim Nachsichern ist höchste Aufmerksamkeit angebracht. Selbst die HMS, einmal ins „Lau-

fen“ gekommen, ist nur mehr schwer unter Kontrolle zu bringen.

**Situation 8: Abseilen**

Je nachdem wie schnell und ruckartig abgeseilt wird, beträgt die Belastung auf Kletterer und Abseilpunkt etwa das zwei- bis

dreifache des Körpergewichts (120 - 240 daN).

Einzelne Normalhaken oder Klemmkeile können damit bereits überfordert sein, wie mehrere Unfälle beweisen.

Wird an einem Twin-Seil oder einem einzelnen Seilstrang abgeseilt, wird ein Abseilachter mit

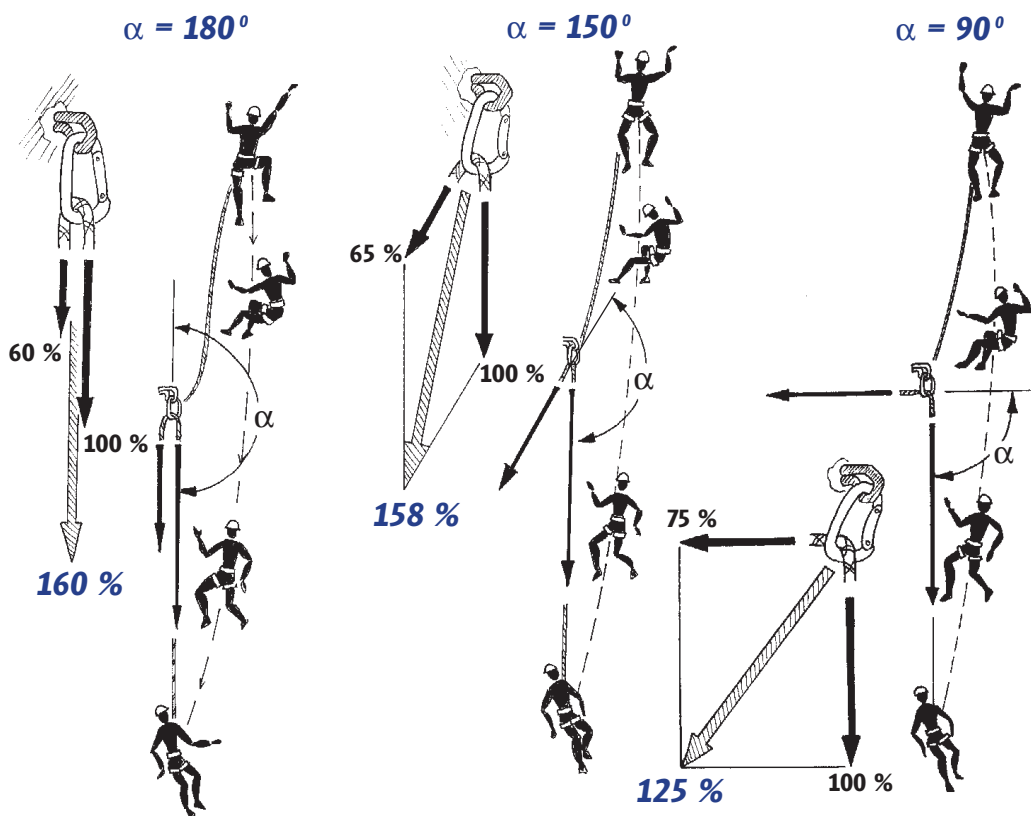
Die Problematik der statischen Sicherung wurde auch bereits von Zsigmondy und Paulcke erkannt:

„Für das Reißen oder Nichtreißen eines Seiles bei einem Sturz usw. kommt es im allgemeinen weniger darauf an, ob es ein paar Kilogramm Zugfestigkeit mehr oder weniger besitzt, als besonders auf die Art der Beanspruchung und den Erhaltungszustand des Seiles. Ernste Betrachtung verdient der Vorschlag von Prof. Braun, Strassburg und seines Mechanikers Roll (Mitt. DÖeAV 1910) als Sicherung gegen das Zerreißen des Seiles bei Abstürzen eine Vorrichtung anzubringen, welche ein unvermitteltes Auftreten starker Zugkräfte verhindert.

Die Herstellung einer handlichen, möglichst leichten Vorrichtung (Metallhülse und Einrollung von etwa einem halben Meter Seil in dieselbe, oder Einschalten elastischer Federn) scheint mir eine sehr dankenswerte Aufgabe. Besonders wäre ein solches Sicherungsmittel zwischen Sichernden und Vorgehenden einzuschalten.“

Aus Paulcke, Zsigmondy: Die Gefahren der Alpen 1912

<sup>3</sup> Zur Vereinfachung lassen wir das Durchrutschen des gedehnten Seiles durch die Umlenkung unberücksichtigt



Zwischensicherungen „bremsen“. Je größer der Umlenkwinkel, desto mehr Reibung entsteht. Der Sichernde wird daher „nur“ mehr mit 60 - 75 % der Kraft belastet, die auf den Gestürzten wirkt. Dadurch ist es z.B. möglich, dass ein leichtes Mädchen (54 kg) einen schweren Jungen (90 kg) ablassen kann, ohne dass sie gleich hochgezogen wird.

Aufgepasst: Auf die Zwischensicherung wirkt die (vektorielle) Summe der beiden Kräfte - zwischen 125 % und 160 % der Kraft, die auf den Gestürzten wirkt. Zwischensicherungen sind also mit Abstand die am stärksten belasteten Glieder in der Sicherungskette!

seiner Bremskraft bereits gefährlich, besonders wenn am Ende der Abseilstrecke das Gewicht des frei hängenden Seiles, welches die Bremshand unterstützt, immer geringer wird.

Das Synchronabseilen (2 Kletterer gleichzeitig) ist wegen vielfältiger Sicherheitsprobleme aus der Mode gekommen - Gott sei Dank!

#### Situation 9: Pendelsturz

Beim Pendelsturz wird die potentielle Energie in Geschwindigkeit umgewandelt, es kommt zu einer Rotationsbewegung und zum Auftreten einer Fliehkraft („Zentrifugalkraft“). Die maximale Geschwindigkeit und die maximale Kraft treten am tiefsten Punkt auf.

Gleichzeitig mit der Fliehkraft wirkt noch die Gravitation, das ergibt in Summe - egal ob 1m oder 20 m Pendelsturz - eine Belastung mit dem 3-fachen Körpergewicht.

Bei kleinen Pendelsturzradien erfährt allerdings der Körper ein größeres Drehmoment, es dreht den Gestürzten und ein Sturz mit Kopf nach unten kann die Folge sein.

Ein freier Pendelsturz ist somit keine grosse Belastung für die Sicherungskette, bei Felsberührung wird der Sturz aber rasch unkontrollierbar, und beim Aufschlagen gilt wieder: Energie = Kraft x Weg, und letzterer beträgt oft nicht einmal eine Nasenlänge als Knautschzone.

Bei Pendelstürzen oberhalb der Zwischensicherung geht die

Situation mit zunehmenden Winkel in die des geraden Vorstiegssturzes über.

#### Situation 10: Der Bungee-Jumper

Der Bungee-Jumper hat zwar die größte Sturzhöhe, aber ein sehr weiches, dehnbare Seil, welches über eine lange Strecke den freien Fall sanft bremst - die Maximalkräfte bleiben im Bereich von etwa 300 - 500 daN.

**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**

Mag. Michael Larcher, 41, Berg&Steigen Chefredakteur, Alpenverein Ausbildungsleiter

**Hinweise:** Die Petzl-Homepage (<http://www.petzl.com>) bietet einiges zum Thema Sturz und Sicherheit. Besonders interessant ist ein Rechenprogramm, der Petzl Sturz-Simulator (<http://www.petzl.com>). Hier kann sich jeder sein persönliches, schmerzfreies Sturzprogramm zusammenstellen. Anleitungen und zugrundeliegende Berechnungsformeln sind detailliert angegeben. Nachdem man sein Gewicht eingegeben hat und sich seine Sicherungskette (Seiltyp, Standplatz, Art und Höhe der Zwischensicherungen, Seilverlauf und Sicherungsgerät) ausgewählt hat, wählt man noch völlig Adrenalinfrei die „gewünschte“ Sturzhöhe.

Das Programm berechnet die Kräfte, die auf den Körper und die einzelnen Sicherungspunkte wirken, man sieht, ob Verletzungen wahrscheinlich wären und welche Sicherungen gehalten hätten. Einen kleinen Fehler hat das Rechenprogramm noch: Werden Zwischensicherungen wieder entfernt, kommt es ins schleudern - nach einem Neustart des Programms geht's wieder.

**Tipp:** Recht aufschlussreich ist die Verwendung unterschiedlicher Sicherungsgeräte oder guter und schlechter Seilverläufe bei sonst gleichbleibenden Bedingungen.

**Weiters:** Auch bei Beal ([www.beal.com](http://www.beal.com)) werden einige Grundlagen der Sturzphysik grafisch gut erklärt.

#### Literatur:

Mägdefrau H.: Die Belastung des menschlichen Körpers beim Sturz ins Seil und deren Folgen, Dissertation, München 1989

Randelzhofer P.: Zur Funktion und Wirkung von Sicherungsgeräten beim Klettern, Diplomarbeit, München 1996

Schubert P.: Alpin-Lehrplan 6, Ausrüstung - Sicherung - Sicherheit, BLV Verlagsgesellschaft, 2. Auflage, 1991

Larcher M.: Sicherungsgeräte, 3-teiliger Beitrag in Berg&Steigen 2/98, 2/99, 3/99