

DIE BEDEUTUNG DER PHYSIK FÜR DIE SICHERHEITS-
AUSRÜSTUNG BEIM BERGSTEIGEN: DAS BERGSEIL

Vortragsausarbeitung eines Examensvortrags
Gehalten vor dem Hauskolloquium des
III. Physikalischen Instituts der
Universität Göttingen am 12.2. 1981

Stephan Jürgenliemk
Lotzestr. 3
3400 Göttingen

INHALT

1.	Einleitung	S. 1
2.	Die Problemstellung	S. 2
3.	Modellhafte Beschreibung der Seileigenschaften beim Sturz	S. 4
3.1.	Das Modell des elastischen Schwingers	S. 6
3.2.	Das Modell der Reibungsbremse	S. 10
4.	Die dynamische Sicherung	S. 12
5.	Methoden zur Messung von Seileigenschaften	S. 17
5.1.	Der Sturzversuch	S. 18
5.2.	Die Seildehnung	S. 20
5.3.	Die Mantel-Verschiebepprüfung	S. 21
5.4.	Die Gebrauchsdehnung	S. 22
5.5.	Die Seildrehung	S. 22
5.6.	Die Knotenfestigkeit	S. 23
5.7.	Resumee	S. 23
6.	Externe Einflußgrößen	S. 24
6.1.	Das Kantearbeitsvermögen	S. 24
6.2.	Seilalter und Arbeitsvermögen	S. 26
6.3.	Sturzfaktor Mensch	S. 26
6.4.	Thermische Bedingungen	S. 27
7.	Resumee	S. 27
	LITERATUR	S. 28

1. Einleitung

Aus einem Bericht des Deutschen Alpenvereins:

"An der Grundschartner-Nordkante in den Zillertaler Alpen kam ein Bergsteiger durch Seilriß ums Leben. Wie später festgestellt werden konnte, war das Seil erst 10 Tage zuvor im Sportgeschäft erstanden und nur zu einer einzigen Bergfahrt zuvor benutzt worden. Nach Überprüfung handelte es sich um ein Einfachseil, das nicht älter als ein 3/4 Jahr gewesen sein konnte, da dieser Seiltyp noch nicht länger auf dem Markt war." (8)¹

Ein derartiger Todesfall wirft natürlich sofort die Frage nach einem technischen Versagen auf. Sind die hochgepriesenen Sicherungsmittel tatsächlich so zuverlässig oder liegen die Gründe für einen derartigen Unfall ausschließlich in menschlichem Versagen? Zumindestens sollte man erwarten, daß die technischen Möglichkeiten in Bezug auf eine Optimierung der Sicherungsmittel ausgenutzt werden. Daß das noch nicht der Fall ist, belegt eine Einschätzung des Sicherheitskreises des DAV: "Seile gehören nach wie vor zu jenen Ausrüstungsgegenständen des Bergsteigers, Fels- und Eisgehers, die sicherheitstechnisch "notwendigerweise weniger als vollkommen" sind." (8).

Die folgenden Ausführungen sollen nun einen Einblick in diese Problematik geben. Als erstes soll dazu die praktische Problemstellung umrissen und die Anforderungen an ein Bergseil formuliert werden. Das Problem der Sturzsicherung soll dann mit Hilfe physikalischer Modelle beschrieben und die Umsetzung der Modelle in die Praxis an Beispielen erläutert werden. Auf diesem Hintergrund werden dann die technischen Gütekriterien für Bergseile dargestellt und diskutiert. In einem abschließenden Kapitel sollen dann noch diejenigen

¹. Die Quellenangaben befinden sich in der Literaturliste.

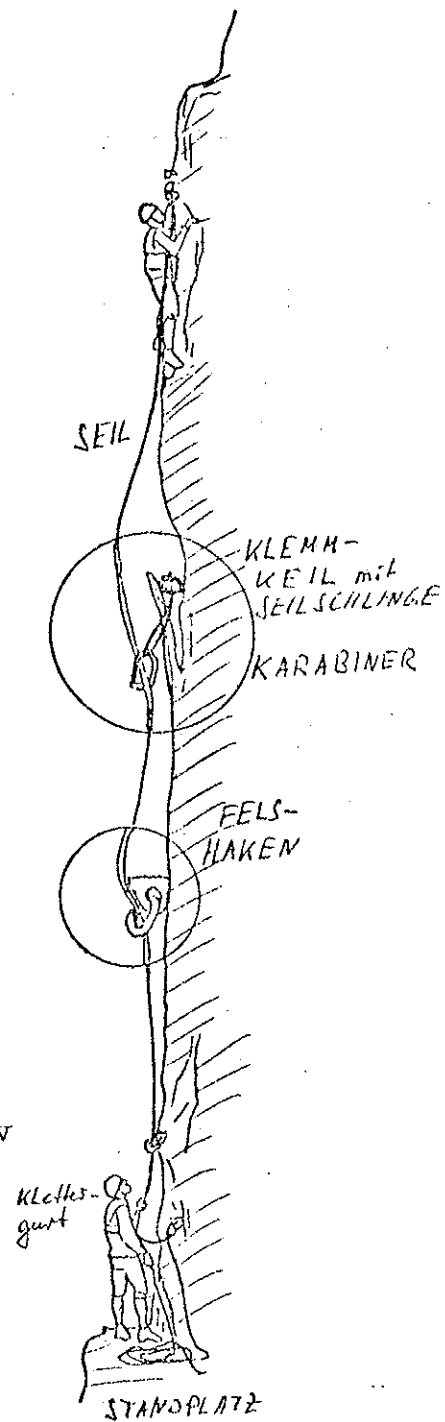
Einflußgrößen Erwähnung finden, die technisch nicht normierbar sind, für die Praxis jedoch eine große Bedeutung haben, wie z.B. die thermischen Bedingungen.

2. Die Problemstellung

Die gesamte Sicherungsausrüstung des Bergsteigers hat im wesentlichen eine einzige Funktion, nämlich die der Sturzsicherung. Die dazu notwendigen Sicherungsmittel werden als Sicherungskette bezeichnet und umfassen: das Seil, Klettergürtel, Fels- haken, Eishaken und -schrauben, Karabiner, Klemmkeile und Seil- schlingen. Die Anforderungen von Haken, Schrauben, Klemm- keilen, Karabinern und Schlin- gen sind recht eindeutig formu- lierbar: sie müssen mit Sturz- kräften bis zu 10 kN, ungünstig- stenfalls sogar bis 20 kN belast- bar sein. Der Klettergurt muß zusätzlich so beschaffen sein, daß er bei derartigen Kräften keine Verletzungen wie Wirbel- stauchungen, Quetschungen etc. hervorruft. All diese Anforde- rungen sind technisch noch relativ leicht normierbar. Anders ver- hält es sich mit dem Bergseil. Es sollte folgende Eigenschaften in sich vereinen:

- eine hohe Zugfestigkeit bei möglichst kleinem Gewicht
- es sollte weich sein, um die Massenkräfte bei einem Sturz klein zu halten, jedoch nicht zu weich, sodaß bei zu großer Durchsenkung die Gefahr des Aufschlagens besteht

DIE SICHERUNGSKETTE



- es sollte drehungsfrei sein
- es sollte geschmeidig und abriebfest sein
- es sollte unempfindlich gegen Feuchtigkeit und Strahlung sein.

Derart unterschiedliche Anforderungen können nur in einem Kompromiß, einer Seilkonstruktion berücksichtigt werden, von der sich die Kern-Mantel-Konstruktion aus Polyamid-Fasern durchgesetzt hat.

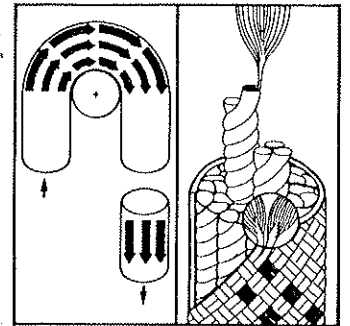


Abb.: Kern-Mantel-Konstruktion (11)

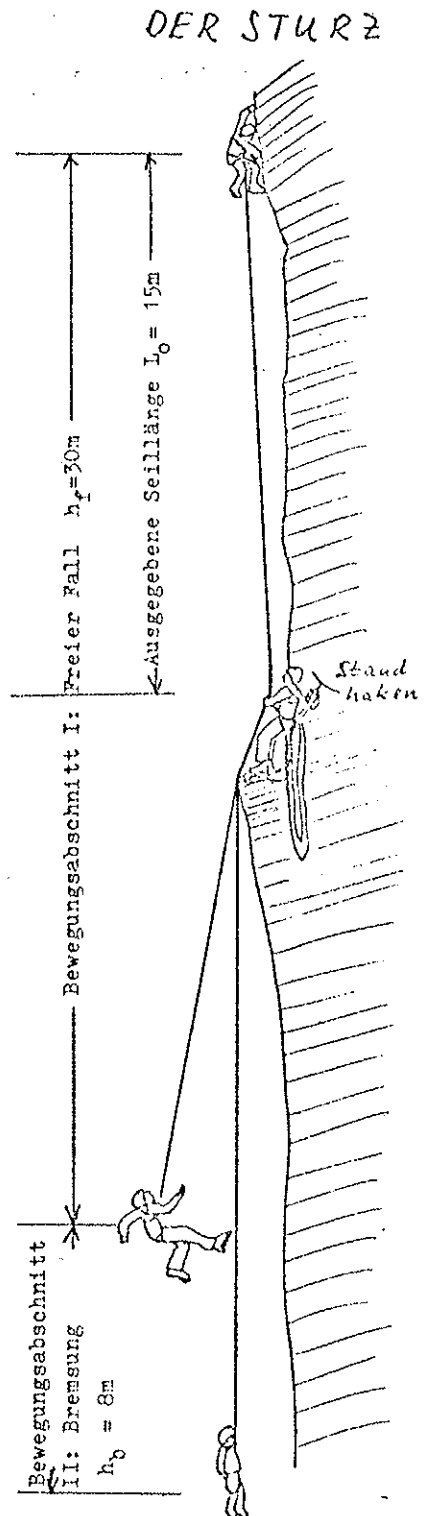
Wie die bei einem Sturz ablaufenden physikalischen Prozesse und daraus resultierend die Anforderungen an das Seil im einzelnen aussehen, soll im folgenden erörtert werden.

3. Modellhafte Beschreibung der Seileigenschaften beim Sturz

In diesem Abschnitt soll versucht werden, die bei einem Sturz in Bezug auf das Seil ablaufenden physikalischen Prozesse mit theoretischen Modellen zu beschreiben. Um sich ausschließlich auf die Seileigenschaften konzentrieren zu können, ist es notwendig, unkontrollierbare Reibungsverluste auszuschließen, d.h. für die Sicherungskette keine Zwischensicherungen anzunehmen. Damit gehört der hier zu diskutierende Sturz zu den schwersten, die in der Praxis denkbar sind. Die ausgegebene Seillänge muß hier die Sturzenergie einer Fallstrecke aufnehmen, die der doppelten Seillänge entspricht.

Das vorliegende System besteht also nur aus dem Seil und dem Kletterer als Sturzmasse. Energetisch kann es als abgeschlossenes System betrachtet werden, in dem der Bewegungsablauf ausschließlich aus der Schwerkraft und den Seileigenschaften resultiert.

Grob läßt sich der gesamte Sturzvorgang in zwei Bewegungsabschnitte untergliedern: einen ersten Abschnitt: "freier Fall" und einen zweiten Abschnitt: "Bremsung". Für den ersten Abschnitt "freier Fall" soll ein tatsächlich freier Fall, wie etwa aus einem Überhang



angenommen werden - der Kletterer schlägt zwischendurch also nirgendwo auf -, zum zweiten soll die Luftreibung vernachlässigt werden. Der Abschnitt "freier Fall" läßt sich also durch eine Umwandlung von potentieller Energie in kinetische Energie charakterisieren.

Mit der bekannten Beziehung $W_{\text{pot}} + W_{\text{kin}} = 0$ ist am Ende des ersten Abschnitts die Fallgeschwindigkeit des Kletterers $v = 2 \cdot g \cdot h_f$, wobei $h_f = 2 \cdot L_0$.

Um eine größenmäßige Vorstellung zu bekommen, sollen zwei Zahlenbeispiele diskutiert werden:

- a) Sei die ausgegebene Seillänge $L_0 = 15$ m - ein Fall, der in der Praxis häufig genug vorkommt - so ist nach einer Fallstrecke von $h_f = 30$ m die Fallgeschwindigkeit $v = 24 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$ ($= 86 \frac{\text{km}}{\text{h}}$)
- b) Der praktische Extremfall wäre die volle ausgegebene Seillänge von $L_0 = 40$ m, was allein schon zu einer freien Fallstrecke von $h_f = 80$ m führt. Die Endgeschwindigkeit ist in diesem Fall $v = 40 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$ ($= 144 \frac{\text{km}}{\text{h}}$)

Der sich nun anschließende zweite Bewegungsabschnitt "Bremsung" beginnt in dem Moment, in dem das Seil belastet wird und den freien Fall bremst. Die kinetische Energie des Kletterers wird nun in Formänderungsenergie durch Dehnung des Seils und in Reibungsenergie umgewandelt. Für diesen Abschnitt kann man sich zwei theoretische Grenzfälle vorstellen:

Fall 1: Der Sturz wird durch ein elastisches, reibungsfreies Seil abgefangen, das an seinem Ende starr fixiert ist.

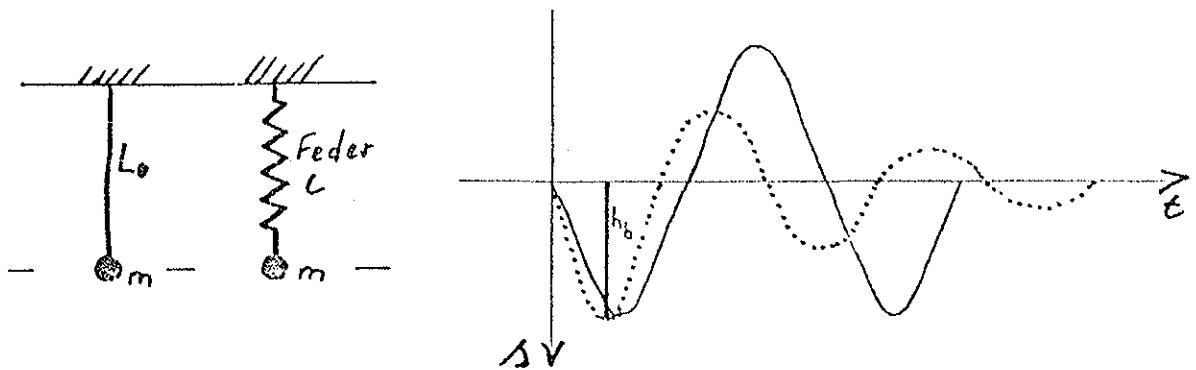
Fall 2: Der Sturz wird durch ein längsstarres Seil abgefangen, das an seinem Ende mit konstanter Reibungskraft gebremst wird.

Die realen Verhältnisse liegen zwischen diesen Denkmodellen, da das Seil durch innere Reibung gedämpft

schwingt und der Sichernde das Seilende kaum starr fixieren kann, sondern sich bei den üblichen Sicherungstechniken ein gewisser Schlupf ergibt.

3.1. Das Modell des elastischen Schwingers

Dieser Fall beinhaltet bei linearer Kraft-Dehnungs-Kennlinie des Seils das Modell des elastischen Schwingers mit der Federrate c und der Masse m . Der Kletterer würde um eine Nullage herum ständig auf und abpendeln. Tatsächlich ist die Schwingung jedoch gedämpft, sodaß sich der Bewegungsablauf einer gedämpften Schwingung ergibt.



Bewegungsablauf

Für die Modelldiskussion im Hinblick auf die Praxis ist nicht der gesamte Bewegungsablauf von Interesse, sondern nur der erste, untere Umkehrpunkt der Schwingung. Gesucht wird die wirkende Kraft F_{\max} und die Größe der Auslenkung h_b in diesem Punkt.

Da Reibungsfreiheit angenommen wurde, lautet die Energiebilanz:

$$W_{\text{pot}} + W_{\text{for}} = 0$$

$$W_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot (h_f + h_b)$$

$$W_{\text{for}} = \frac{1}{2} \cdot c \cdot h_b^2$$

$$\frac{1}{2} c h_b^2 = m \cdot g \cdot (h_f + h_b)$$

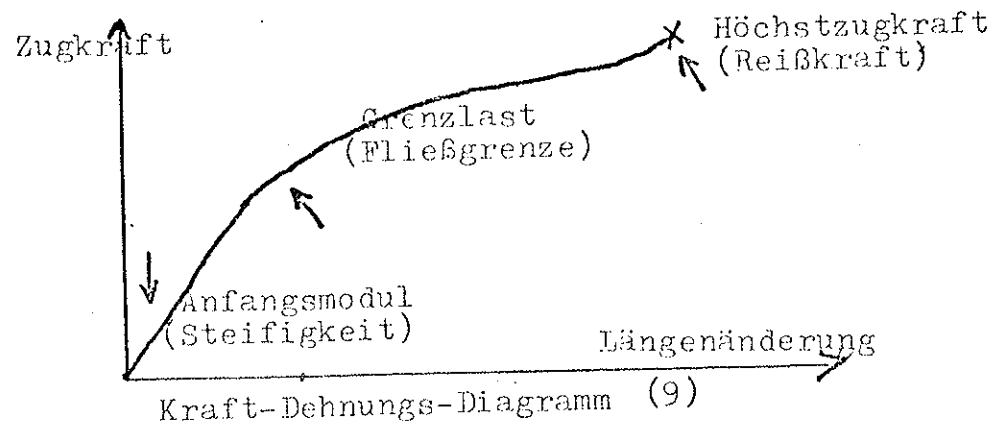
$$h_b = \frac{m \cdot g}{c} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{2 \cdot c \cdot h_f}{m \cdot g}} \right); \quad \text{mit } F = c \cdot h_b \quad \text{wird}$$

$$F_{\text{max}} = m \cdot g \left(1 + \sqrt{1 + \frac{2 \cdot c \cdot h_f}{m \cdot g}} \right)$$

Bevor die Zahlenbeispiele berechnet werden können, ist es notwendig, einen kleinen Exkurs zur Federrate c zu machen. In den Modellberechnungen wurde ja eine lineare Kraft-Dehnungs-Kennlinie angenommen, sodaß sich nach dem Hookeschen Gesetz die Federrate c zu $c = \frac{E_0 \cdot A_0}{L_0}$ ergeben würde. $E_0 \left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right]$ ist der Elastizitäts- oder Dehnungsmodul; $A_0 \left[\text{m}^2 \right]$ die Querschnittsfläche und $L_0 \left[\text{m} \right]$ die Seillänge. Angenommen war eine lineare Kennlinie und damit E_0 , bzw. c als Konstanten. Diese Annahme gilt für die Praxis nur bedingt. Das Bergseil besteht ja im wesentlichen aus gebündelten Polyamidfasern und derartige Hochpolymere haben sehr differenzierte Dehnungseigenschaften. Der Elastizitätsmodul ist keine Konstante mehr, sondern von den Variablen Dehnung und Dehnungsgeschwindigkeit abhängig. Er wird zur Modulfunktion. Die Abhängigkeiten sollen hier nur soweit umrissen werden, wie sie für das Verständnis der vorliegenden Zusammenhänge notwendig erscheinen.

Für die Dehnungsgeschwindigkeit gilt, daß je schneller die Belastung erfolgt - innerhalb von mehreren Minuten oder in Sekundenbruchteilen - desto höher ist der Dehnungsmodul, d.h. desto härter ist das Seil.

Zum zweiten ist der Dehnungsmodul von der Dehnung selbst abhängig.



Im direkten Zusammenhang mit dem Absolutwert der Dehnung steht auch das elastische Zusammenziehen des unbelasteten Seils auf seine ursprüngliche Länge. Werden bestimmte, kleine Intervall zu Beginn der Dehnung überschritten, kommt es in verstärktem Maße zu irreversiblen Molekülverschiebungen innerhalb der Fasern, d.h. zu einer bleibenden Dehnung. Für die Praxis ist das ein durchaus erwünschter Effekt, da hier Sturzenergie durch innere Reibung vernichtet wird. Nach einer solchen Überdehnung durch einen schweren Sturz muß das Bergseil sofort ausgesondert werden, da das Arbeitsvermögen irreversibel verloren gegangen ist.

Wieder zurück zur Bestimmung der Federrate c .
Nach obigen Überlegungen darf der Elastizitätsmodul nicht aus einem (statischen) Kraft-Dehnungs-Diagramm entnommen werden, sondern nur einem dynamischen Dehnungsversuch, einem Sturzversuch. In einem entsprechenden Experiment wurde eine Maximalkraft von $F_{\max} = 10,5 \text{ kN}$, und eine Dehnung von 20% gemessen, woraus sich für $E_0 A_0$ der Wert $E_0 A_0 = 52,5 \text{ kN}$ ergibt.

Für das Modell des statisch fixierten, elastischen Schwingers mit den elastischen Eigenschaften gebräuchlicher Bergseile lassen sich folgende Weg- und Kraftwerte berechnen:

- a) $L_0 = 15 \text{ m}$: $h_b = 3,9 \text{ m}$ $F_{\max} = 13,8 \text{ kN}$
b) $L_0 = 40 \text{ m}$: $h_b = 10,5 \text{ m}$ $F_{\max} = 13,8 \text{ kN}$

Auffällig ist an den Ergebnissen, daß trotz unterschiedlicher Fallstrecken die auftretenden Maximalkräfte gleich groß sind. Dieser Effekt erklärt sich dadurch, daß im zweiten Fall auch mehr energieverzehrende Seillänge zur Verfügung steht. In Kletterpraxis wird dieser Sachverhalt mit dem Begriff des Sturzfaktors umschrieben. Der Sturzfaktor f ist definiert als Verhältnis von freier Fallstrecke und ausgegebener Seillänge. Als Faustregel gilt, daß die Härte eines Sturzes (die Größe von F_{\max}) nur vom Sturzfaktor abhängig ist, nicht aber von der Fallhöhe, was an der folgenden überschlägigen Rechnung deutlich wird.

$$W_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot h_f$$

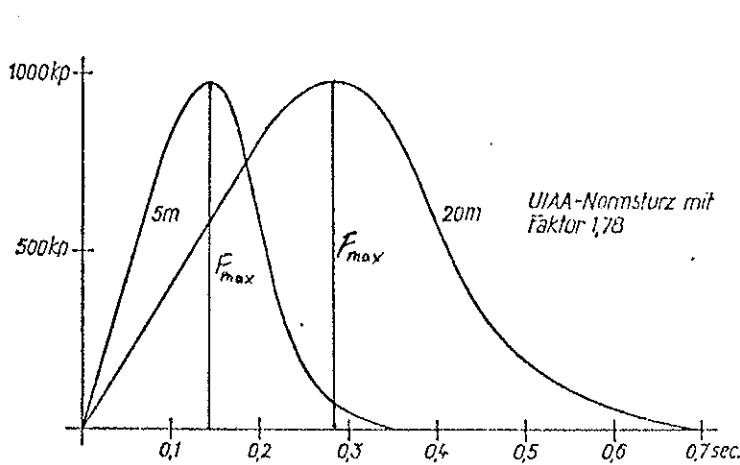
$$W_{\text{for}} = 1/2 \cdot c \cdot h_b^2 = 1/2 \frac{F^2}{c} = \frac{L_0}{2 \cdot E_0 \cdot A_0} F^2$$

$$F^2 = \frac{h}{L_0} f \cdot (m \cdot g \cdot 2 \cdot E_0 \cdot A_0) = \frac{h}{L_0} f \cdot \text{const.}$$

$$F_{\max}^2 \sim f = \frac{h}{L_0} f$$

Bei Stürzen aus unterschiedlichen Höhen mit dem gleichen Sturzfaktor (in obigen Beispielen $f = 2$) ist jedoch die Gesamtimpulsänderung verschieden, d.h. die Fläche unter dem Kraft-Zeit-Diagramm. Bei gleichen Spitzenwerten wird also die Belastungsdauer um so größer sein, je größer die Fallstrecke war.

Für die gesamte Sicherungskette ist nicht nur die Größe der Maximalkraft sondern auch die Dauer der Krafteinwirkung von Bedeutung. Ein Haken, der einer



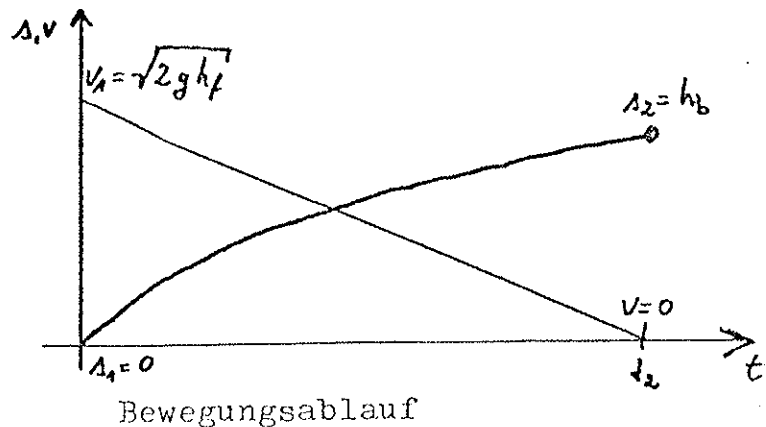
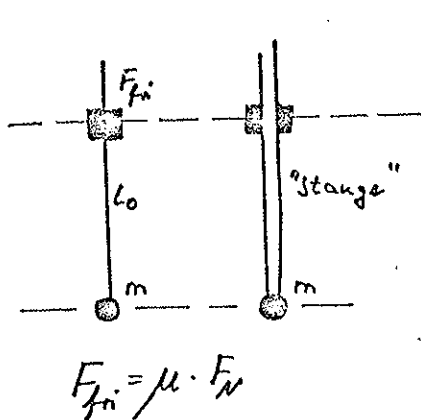
$$\Delta \vec{p} = \int_{t_0}^{t_1} \vec{F}(t) dt$$

Abb.: Kraft-Zeit-Diagramm (12)

Kraft für 2/10 Sekunde ausgesetzt ist, kann dem Ruck eher standhalten als der gleichen Belastung über 1 Sekund
 Noch eine Bemerkung zur Begrifflichkeit: in der Bergsteigerliteratur wird die Maximalkraft nicht ganz korrekt Fangstoß genannt.

3.2. Das Modell der Reibungsbremse

Der zweite theoretische Grenzfall entspricht dem Fall Coulombscher Reibung starrer Körper und hat keine Schwingung zur Folge. Hier wird ein längsstarres Seil über eine Reibungsbremse verzögert, die in der Praxis einer Seilbremse entspricht.



Gebremst wird hier mittels der Gleitreibungskraft zwischen zwei festen Körpern, die nach dem Coulombschen Reibungsgesetz proportional der Normalkraft ist, die beide Körper aneinanderpreßt. Ausgenommen im Übergangsbereich von Haft- zur Gleitreibung ist die Gleitreibungskraft geschwindigkeitsunabhängig. Für die Modelldiskussion soll der Fall konstanter Reibungskraft angenommen werden. Gesucht werden auch hier die Werte für die Bremsstrecke und die Bremskraft, also die verzögernde Kraft.

$$\text{Energiebilanz: } W_{\text{fri}} + W_{\text{pot}} = 0$$

$$W_{\text{fri}} = F_{\text{fri}} \cdot h_b$$

$$W_{\text{pot}} = m \cdot g (h_f + h_b)$$

$$h_b = \frac{m \cdot g \cdot h_f}{F_{\text{fri}} - m \cdot g}$$

$$F_{\text{fri}} = m \cdot g \left(\frac{h_f}{h_b} + 1 \right)$$

Bremsweg und Bremskraft sind in diesem Modell voneinander abhängig, sodaß sich für die Zahlenbeispiele ergibt:

a) $L_o = 15 \text{ m}$: Für $h_b = 3,9 \text{ m}$ ist $F_{\text{fri}} = 6,95 \text{ kN}$
Für $F_{\text{fri}} = 13,8 \text{ kN}$ ist $h_b = 1,85 \text{ m}$

b) $L_o = 40 \text{ m}$: Für $h_b = 10,5 \text{ m}$ ist $F_{\text{fri}} = 6,9 \text{ kN}$
Für $F_{\text{fri}} = 13,8 \text{ kN}$ ist $h_b = 4,9 \text{ m}$

Eine in der Kletterei gebräuchliche Seilbremse ist die Sticht-Bremse, die eine maximale Bremskraft von ca. $F_{\text{fri}} = 4 \text{ kN}$ besitzt. Mit dieser Bremse würden sich für die zwei Zahlenbeispiele folgende Werte ergeben:

a) $L_o = 15 \text{ m}$: $F_{\text{fri}} = 4 \text{ kN}$ $h_b = 7,5 \text{ m}$

b) $L_o = 40 \text{ m}$: $F_{\text{fri}} = 4 \text{ kN}$ $h_b = 20 \text{ m}$

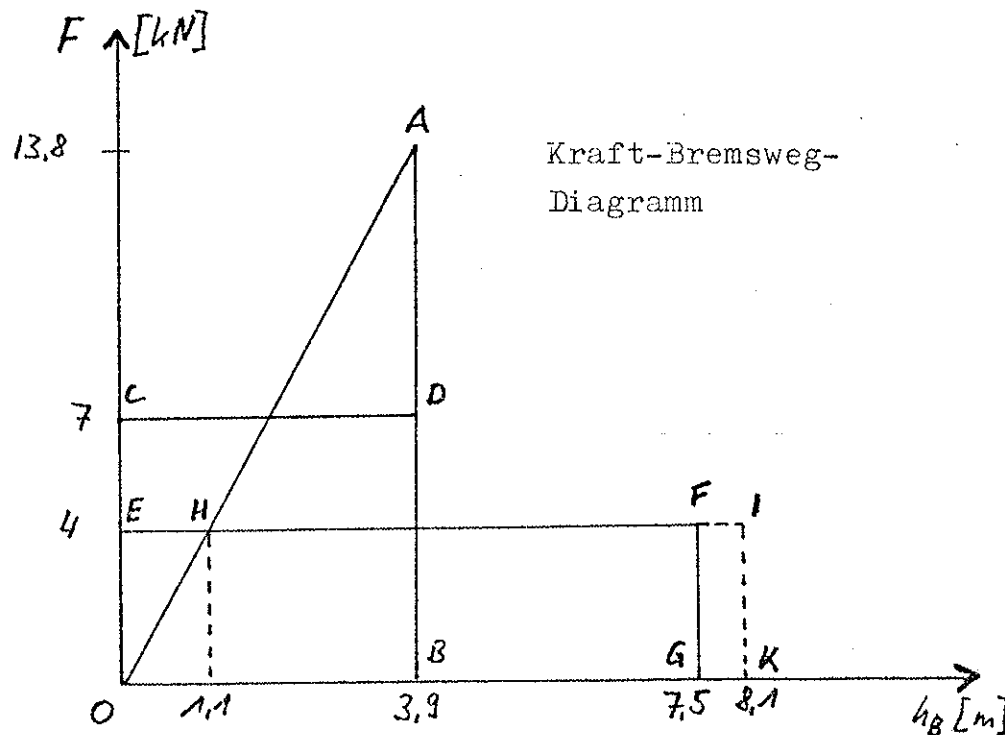
Schon diese theoretische Betrachtung der beiden Modelle zeigt, daß das Modell der Reibungsbremse in verschiedener Hinsicht effektiver ist als das elastische Auffangen eines Sturzes, auch wenn die Schwingung in der Praxis gedämpft erfolgt:

Der Bremsweg ist bei gleicher Bremskraft kürzer, es tritt keine Überschwingung auf und die maximale Kraft ist bei gleichem Bremsweg geringer!

Einschränkend ist allerdings festzuhalten, daß bei der Reibungsbremse der Bremsweg in Form von Seilreserve zur Verfügung stehen muß, d.h., daß das Seil rund 50% länger sein müßte (vgl. 80-Meter-Sturz bei 40 m freier Seillänge erfordert 20 m Seilreserve); gleichzeitig könnten die Seile schwächer und damit leichter sein, da die auftretenden Maximalkräfte geringer sind.

4. Die dynamische Sicherung

Die besonderen Vorteile der Reibungsbremse haben in den letzten 10 Jahren auch Eingang in die Praxis gefunden und zur Entwicklung spezieller Seilbremssysteme geführt. Die Kombination von Bremse und Seil wird als dynamische Sicherung bezeichnet und läßt sich theoretisch sehr gut als Kombination der zwei oben beschriebenen Modelle diskutieren. Das folgende Kraft-Bremsweg-Diagramm soll diese Koppelung veranschaulichen. Das Modell des elastischen Schwingers fällt durch seine hohe Maximalkraft auf, dem Modell der Reibungsbremse lag die praxisfremde Annahme eines dehnungsfreien Seils zugrunde. Eine praxisorientiertere Betrachtung wird in der Form möglich, daß die Reibungsbremse bis zum Erreichen der Bremskraft statisch wirkt (Das Übergangsproblem von Haft- zur Gleitreibung soll hier einmal vernachlässigt werden). Die Sturzenergie wird also in diesem ersten Abschnitt in Dehnarbeit umgewandelt, wobei wieder ein linearer Kraft-Dehnungszuwachs angenommen werden soll. Bei Erreichen der Bremskraft wächst der Fangstoß nicht



- OAB : Modell des elastischen Schwingers
- OCDB : Modell der Reibungsbremse mit $h_b = 3,9$ m
- OFG : Modell der Reibungsbremse mit $F_{fri} = 4$ kN
- OHKI : Dynamische Sicherung

weiter an, sondern das Seil gleitet nun mit konstanter Reibung durch die Bremse bis die gesamte Sturzenergie verzehrt ist.

Bei Fehlen einer Zwischensicherung ergibt sich folgender Ansatz:

$$W_{pot} + W_{for} + W_{fri} = 0$$

wobei: $W_{pot} = m \cdot g \cdot (h_f + h_{for} + h_{fri}); h_b = h_{for} + h_{fri}$

$$W_{for} = \frac{1}{2} \cdot c \cdot h_{for}^2 \quad \text{mit } E_0 A_0 = 52,5 \text{ kN}$$

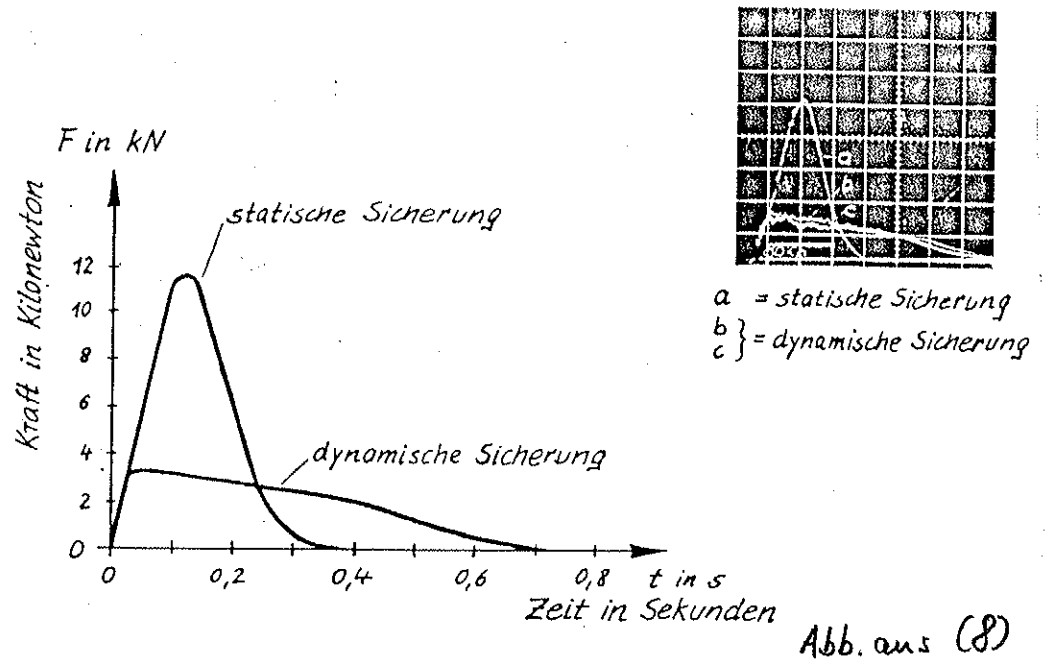
$$W_{fri} = F_{fri} \cdot h_{fri}$$

Wenn als Seilbremse eine Sticht-Bremse verwendet wird, so folgt für die Zahlenbeispiele:

- a) $L_0 = 15 \text{ m}$: $h_b = 8,1 \text{ m}$; Seilreserve ca. 7 m
- b) $L_0 = 40 \text{ m}$: $h_b = 21,8 \text{ m}$; Seilreserve ca. 19 m

Damit wird die Bremsarbeit im wesentlichen über die Reibungsbremse geleistet. Die elastischen Eigenschaften des Seils spielen bei der dynamischen Sicherung nur noch eine untergeordnete Rolle.

Der Kraft-Zeit-Verlauf der dynamischen Sicherung hat im praktischen Versuch folgendes Aussehen:



Schon die theoretische Erörterung hat gezeigt, daß ein optimales Bremssystem nicht nur aus einem Bergseil mit seinen spezifischen Eigenschaften bestehen sollte, sondern aus einer aufeinander abgestimmten Kombination von Reibungsbremse und Seil. So muß eine gute mechanisch-dynamische Sicherung in der Praxis folgende Bedingungen erfüllen:

- Sie muß einfach zu bedienen sein und schnelles Seil-abgeben und -einholen ermöglichen.
- Sie muß einen variablen Bremskraftbereich zwischen 2,5 - 6 kN haben, um die Bremskraft den unterschiedlichen Bedingungen anpassen zu können: weiche Sicherung

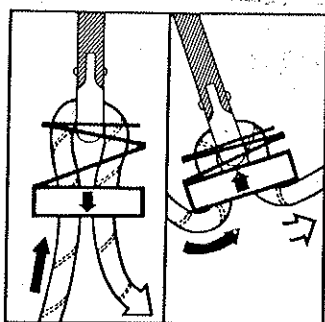
im Eis und Firn, harte Sicherung im Fels.

- Sie muß bei schweren und leichten Stürzen und möglichst auch bei trockenen und nassen Seilen gleich gut funktionieren.
- Sie muß unabhängig von der Belastungsrichtung - von oben oder von unten - bremsen.

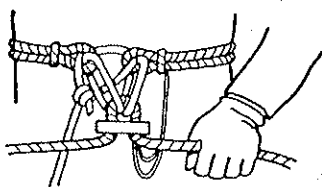
Von der Industrie werden beispielsweise folgende dynamische Sicherungen angeboten:

1) Die Sticht-Bremse

Diese Bremse besteht aus einer Aluminiumplatte mit einem Schlitz, durch den das Seil gezogen und im

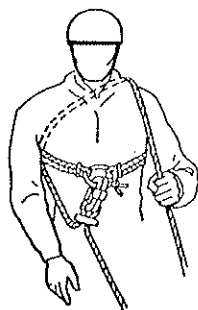


Karabiner eingehängt wird. Die Abbildung zeigt links die Arbeitsstellung und rechts die Bremsstellung. Die Sticht-Bremse hat den Nachteil, daß sie bei Zug von unten nicht halbautomatisch wirkt. In der hier abgebildeten Form beträgt die Bremskraft ca. 2,2 kN.



Bremsstufe II:

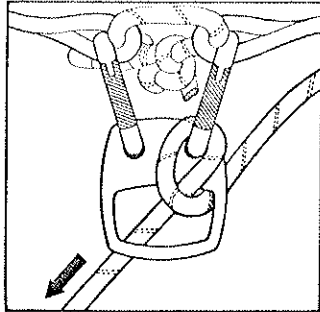
Durch Hinzuschalten eines zweiten Karabiners kann die Bremskraft auf ca. 3,5 kN erhöht werden



Bremsstufe III:

Durch zusätzliche Körperreibung kann die Bremskraft auf ca. 4,5 kN erhöht werden. Grundsätzlich sind bei allen dynamischen Sicherungen höhere Bremskräfte durch Hinzufügen von Körperreibung möglich.

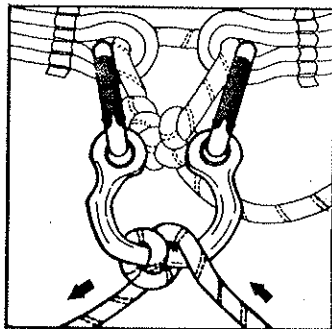
2) Edelrid-Bremsbügel Bankl.



Bremsstufe I: Bremskraft ca. 2,5 kN
Im Unterschied zur Sticht-Bremse verläuft hier Seil über Seil, was bei schnellem Seildurchlauf Mantelbeschädigungen hervorrufen kann!

Bremsstufe II: mit Körperbremse beträgt die Bremskraft ca. 4 kN

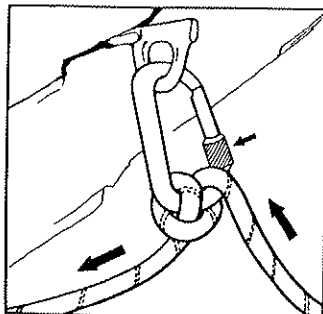
3) Frog-Halbmastwurf-Sicherung



Bremsstufe I: Bremskraft ca. 2,5 kN

4) Karabiner-Halbmastwurf-Sicherung

Bremsstufe I: Bremskraft ca.
3,5 - 4,0 kN

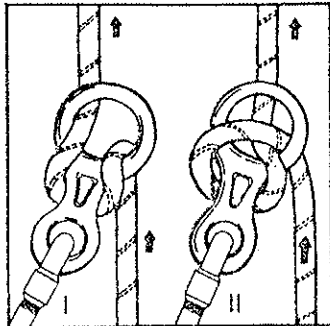


Seilverlauf im Prinzip wie bei 3)

5) Seilachtersicherung

Bremsstufe I: Bremskraft ca. 1,1 kN

Bremsstufe II: Bremskraft ca.
2,2 kN



Für den praktischen Umgang mit diesen dynamischen Sicherungen ist auf zwei Punkte besonders hinzuweisen:

1. Je nach den Verhältnissen, also nach der Härte der gewählten Bremstufe und nach Zahl der Zwischensicherungen, ist immer auf ausreichende Bremsseilreserve zu achten.
2. Um den Seildurchlauf möglichst gering zu halten, sollte das Seil bei einem Sturz so fest wie möglich gehalten werden. Dazu können Lederhandschuhe nur dringend empfohlen werden (man denke an einen Seildurchlauf von 7 Metern mit einer Anfangsgeschwindigkeit von ca. 20 m/sec).

5. Methoden zur Messung von Seileigenschaften

In diesem Kapitel sollen die technischen Meßverfahren dargestellt und diskutiert werden, die Aussagen über die Güte eines Bergseils machen sollen.

Diese Meßmethoden stehen quasi zwischen der Theorie und der Praxis, da sie die Bedingungen der Praxis möglichst gut realisieren, gleichzeitig aber auch die Reproduzierbarkeit eines wissenschaftlichen Experiments besitzen sollen. Diese Bemühungen resultieren aus dem Wunsch, allgemein gültige, internationale Qualitätsnormen für Bergseile festzuschreiben zu können, die dem Kletterer eine qualitative Beurteilung seiner Ausrüstungsgegen-

stände erlauben und die Industrie auf eine Weiterentwicklung des technischen Geräts verpflichten.

Aus den oben bereits genannten Anforderungen an das Bergseil lassen sich einige Kriterien zur Beurteilung der Seilgüte ableiten, die ihren praktischen Niederschlag in sechs verschiedenen, genormten Versuchen gefunden haben. Zwei dieser Versuche, der Sturzversuch und die Zerreißprobe, beziehen sich im wesentlichen auf die Sicherheit des Seils, die restlichen vier - die Mantel-Verschiebepfung, die Gebrauchsdehnung, die Seildrehung und die Haltbarkeit von Knoten - eher auf die Gebrauchsfähigkeit und Geschmeidigkeit des Seils. Der Fallversuch, die Gebrauchsdehnung und die Knotenfestigkeit sind bereits von der internationalen Vereinigung der Alpinisten Verbände (UIAA) normiert.

5.1. Der Sturzversuch

Der Versuchsaufbau des normierten Sturzversuchs nach UIAA sieht wie folgt aus:

Der Versuch simuliert einen sehr harten Sturz mit dem Sturzfaktor 1,78, bei dem das Seil durch einen Umlenkpunkt verläuft und am freien Ende starr fixiert ist. Die gesamte Seillänge beträgt 2,8 m, von denen 2,5 m frei beweglich sind und über einen Umlenkanten von $r = 5 \text{ mm}$ (entspricht dem Schenkelquerschnitt des genormten Karabiners) und einen Winkel von 150° umgelenkt wird. Als Sturzwgewicht wird i.A. ein starres Gewicht von 80 kg verwendet, das in einer Schiene läuft, um Pendelbewegungen auszuschließen.

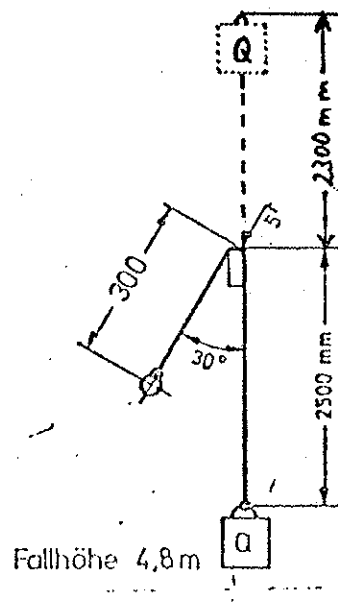
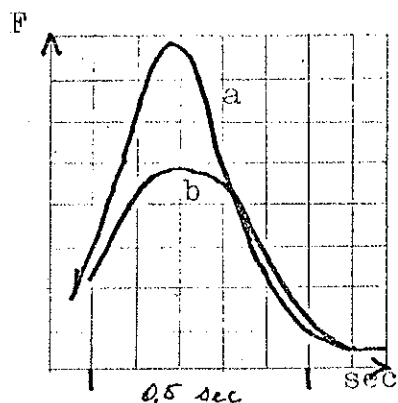


Abb. nach (4)

Exkurs:

In den bisherigen Erörterungen ist die Seilumlenkung sorgfältig ausgespart worden, da im Mittelpunkt die Seileigenschaften standen und durch die Umlenkung eine unkontrollierbare Reibungsgröße mit hineingenommen worden wäre. Für die Praxis ist aber der letzte Fall der wahrscheinlichere, sodaß an dieser Stelle die Größe dieser Reibungskraft abzuschätzen ist. Theoretisch kann die vorne abgeleitete Fangstoßformel für den Sturz ohne Umlenkung mit einer in einem Katalog angegebenen Fangstoßformel für den Sturz mit Seilumlenkung verglichen werden. Danach hat der Fangstoß mit Umlenkung eine Größe von ca. 77% des freien Fangstoßes. Nach ersten, vom DAV veröffentlichten Versuchsergebnissen (vgl. Abb.) und nach Katalogangabe eines Seilherstellers beträgt dieser Wert allerdings nur ca. 62%, sodaß der Reibungsverlust durch die Umlenkung auf etwa 35% geschätzt werden kann.



Einfluß des Umlenkkarabiners auf den Fangstoß: $M = 40 \text{ kg}$
 $L_0 = 5 \text{ m}$; $h_f = 5 \text{ m}$; $f = 1,0$
a) ohne Umlenkkarabiner
b) mit Umlenkkarabiner

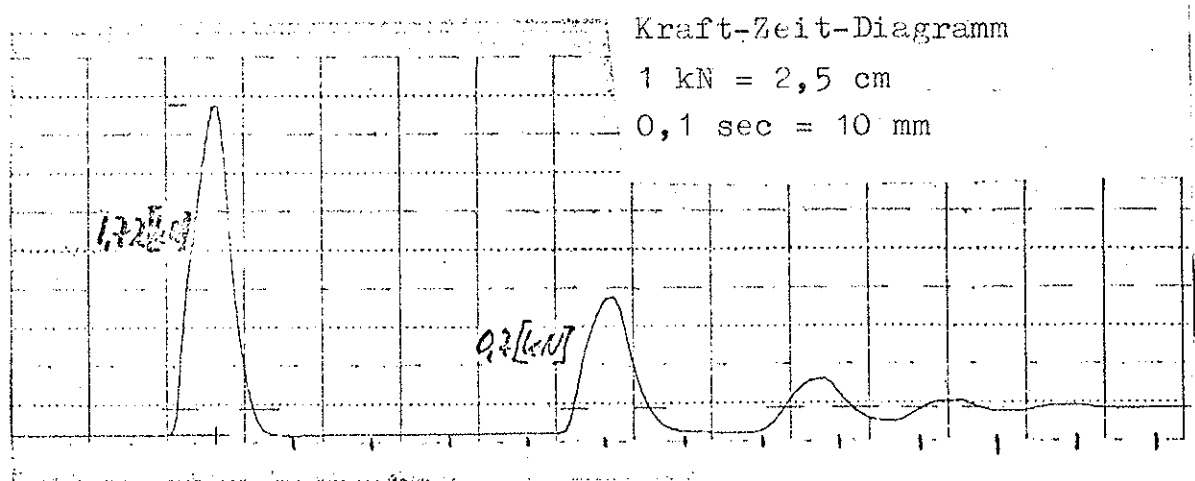
Abb. nach (7)

Eine Seilprobe muß nun nach den neuesten UIAA-Bestimmungen 5 Fallversuche bruchfrei überstehen, die in einem Abstand von 5 Minuten durchgeführt werden. Verschärfend kommt hinzu, daß bei jedem Sturz immer der gleiche Seilabschnitt über die Kante läuft. Beim ersten Sturz darf der Fangstoß 12 kN nicht überschreiten und als Empfehlung gilt, daß die Fangstoßdehnung 35% nicht überschreiten sollte.

Beispielsweise verzeichnet ein entsprechendes Versuchsprotokoll (nach (4)) 5 bruchfrei überstandene Stürze

mit einem Fangstoß von 10,5 kN und einer Fangstoßdehnung von 20%. Für eine komplette Seilprüfung werden drei Segmente aus einem normalen Seil ausgewählt, da sich gezeigt hat, daß die Seilgüte gemessen an der Fangstoßzahl innerhalb eines Seil um bis zu 30% schwankt.

Bei dem Sturzversuch wird mit einem Dehnungsmeßstreifen

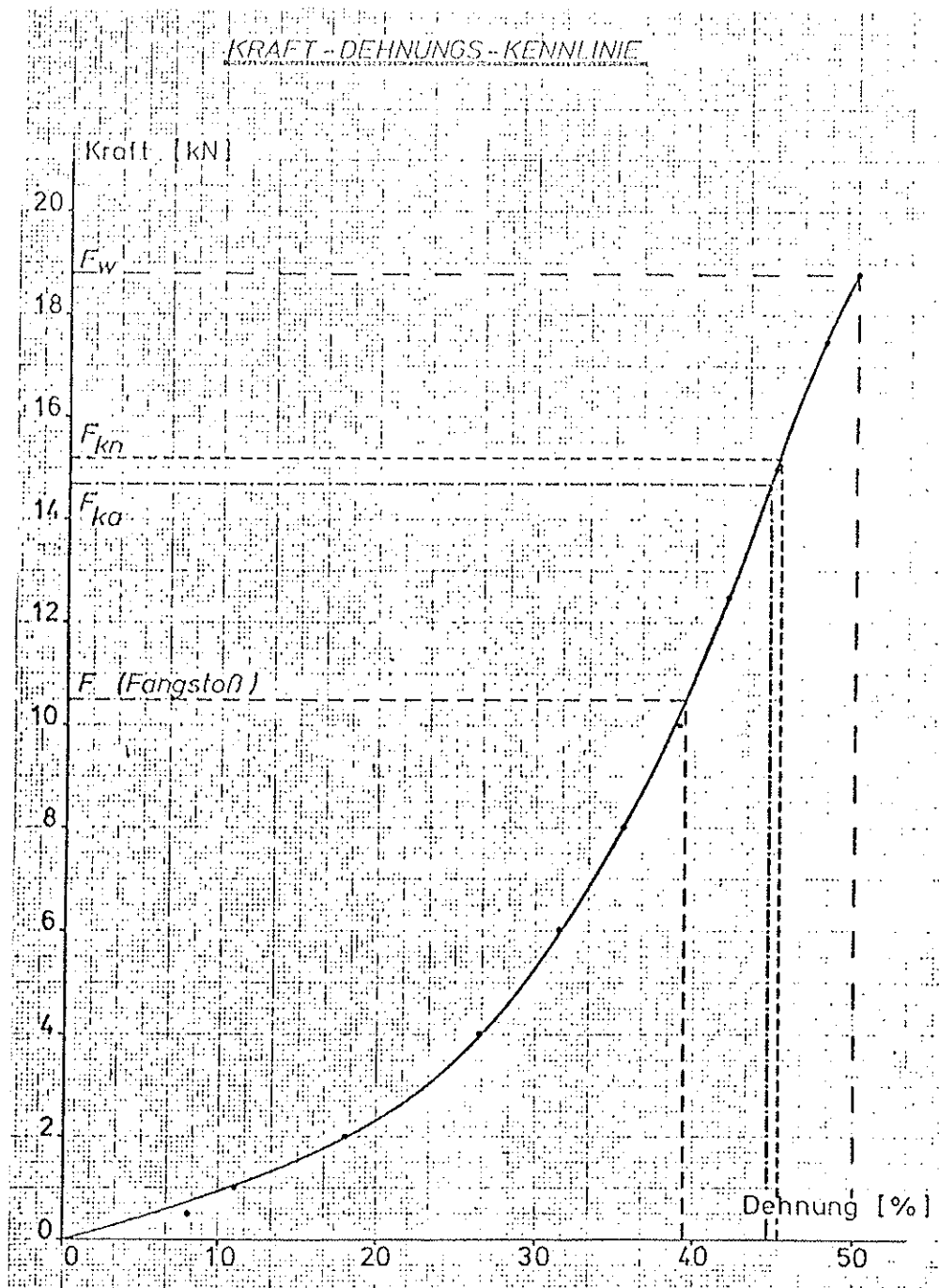


der Kraft-Zeit-Verlauf aufgezeichnet, der obiges Aussehen hat. (Quantitativ entspricht er nicht dem normierten Sturzversuch!) Auffällig ist hier besonders das Nachschwingen der Masse.

5.2. Die Seildehnung

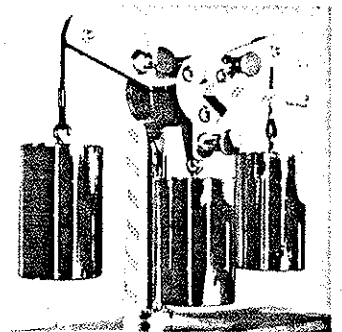
In diesem Versuch wird das Seil in eine Vorrichtung gespannt und langsam belastet. Wie oben schon ausgeführt ist der Elastizitätsmodul von Dehngeschwindigkeit und Dehnung abhängig, sodaß die hier ermittelten Werte nicht für eine dynamische Belastung gelten können (Der Elastizitätsmodul ist in diesem Versuch etwa nur halb so groß wie im Sturzversuch.). Das Seil wird bis zum Bruch belastet (F_w), in einem zweiten und dritten Durchlauf bei zwischengelegter Kante (F_{ka}) und Knoten (F_{kn}). Ein Kraft-Dehnungs-Diagramm (nach (4)) ist auf der folgenden Seite abgebildet.

Die Kanten- bzw. Knotenfestigkeit und damit die praktische Reißfestigkeit ist ca. 20 - 30% geringer als die volle Reißfestigkeit.



5.3. Die Mantel-Verschiebeprüfung

In diesem Versuch wird ein Seilstück von 2 m Länge mehrere Male durch ein Verschiebegerät (vgl. Abb. rechts; nach (11)) gezogen, das das Seil mit konstanter Kraft umschließt. Nach 5 Durchzügen sollte die Kern-Mantel-Verschiebung nicht mehr als 5 mm betragen.



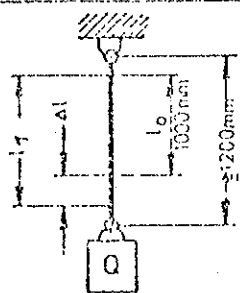
Der Sinn dieser Prüfung liegt darin, daß der praktische

Gebrauch eines Seils sehr gering wird, wenn der Mantel lose auf dem Kern gleitet (z.B. beim Abseilen), was bei schlechten Seilen durchaus vorkommen kann.

5.4. Die Gebrauchsdehnung

Unter Gebrauchsdehnung ist hier nicht "zeitlicher Gebrauch" gemeint, sondern die Dehnung bei einer langsamen Belastung mit 80 kg, wie sie bei Sicherung des Seilzweiten, beim Abseilen etc. vorkommt. Die zulässige Dehnung ist nach UIAA maximal 8%.

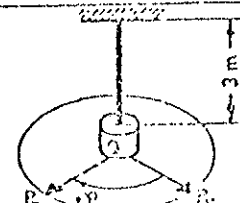
Versuchsbeschreibung nach (4):

Gebrauchsdehnung nach UIAA	EL = 2,5 m
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Seil stofffrei mit 80 kg belasten 2. 10 min Dauerbelastung mit 80 kg 3. Seil ganz entlasten 4. 10 min Dauereutlastung 5. Seil mit 5 kg belasten 6. Is auf Seil markieren 7. Seil stofffrei mit 80 kg belasten. 8. Nach 60 ± 5 sec Δl messen

5.5. Die Seildrehung

Der Grundgedanke dieses Versuchs ist, daß ein Kletterer, der am belasteten, freien Seil hängt, nicht in Rotation kommen darf, wie es z.B. bei gedrehten Seilen vorkommt. Im Versuch wird ein mit ca. 7 kg vorbelastetes Seilstück mit $Q_z = 100$ kg zusätzlich belastet und die Drehung gemessen.

Versuchsbeschreibung nach (4):

Seildrehung nach TL DWD	EL = 4 m
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Seil mit 100-fachem Metergewicht belasten (Vorlast) 2. Nullstellung markieren 3. Zusatzlast Q_z stofffrei aufbringen 4. Drehung messen <p>Sollwert: $p \leq 180^\circ$</p>

5.6. Die Knotenfestigkeit

Auch dieser Test ist sehr relevant für den Gebrauchswert eines Seils, da sich ein Knoten z.B. im Klettergurt nicht unbeabsichtigt öffnen darf, wenn er ohne Belastung ist. Nach der UIAA-Norm wird ein Seilstück von 2 m Länge 1 Minute lang mit 10 kg belastet und anschließend die Belastung auf 1 kg reduziert. Nun darf sich ein Stößel mit dem Durchmesser des Seils nur mit Kraftaufwand durch den Knoten drücken lassen.

5.7. Resumee

Wie oben bereits erwähnt, sind der Fallversuch, die Gebrauchsdehnung und die Knotenfestigkeit von der UIAA normiert. Seitdem es diese Normen gibt, insbesondere den Fallversuch, ist es der Industrie in nur 5-6 Jahren gelungen, die Zahl der bruchfrei überstandenen Stürze von ca. 4 auf 13 zu erhöhen. Die Normierung hat also eine ungeheure Weiterentwicklung auf diesem Sektor hervorgerufen, was seinen Grund wohl auch nicht zuletzt in der Werbewirksamkeit von "sicheren Seilen" hat. Nach den obigen theoretischen Betrachtungen ist diese Entwicklung aber auch kritisch zu sehen, denn im Sturzversuch wird ausschließlich auf das Modell des starr fixierten Schwingers Bezug genommen, obgleich eine Kombination von Seil und Reibungsbremse wesentlich günstiger erschien. Die Seilwerte nach dem "Normsturz" liegen zwar auf der "sicheren" Seite, aber dennoch werden die Seileigenschaften im Hinblick auf ein ungünstiges und in der Praxis der dynamischen Sicherung kaum mehr gebräuchliches Modell optimiert. So sind die "Multi-sturzseile" ca. 20% weicher, ca. 15% schwerer und haben eine etwa 25% höhere Bruchfestigkeit von 30 kN.

Ein Grund für die Bevorzugung des statisch fixierten Schwingers mag sein, daß sich eine Reibungsbremse technisch wesentlich schlechter normieren läßt, während das bei fixierten Seilenden keine Probleme bereitet.

Allerdings sollten derartige Gründe nicht dazu führen, die Seilentwicklung in eine falsche Richtung zu drängen; vielmehr erscheint eine Optimierung der Kombination von Seilbremse und Seil wesentlich sinnvoller.

Die häufig beobachtbare Diskrepanz zwischen Praxisanforderungen und technischen Normen läßt sich leider auch hier feststellen.

6. Externe Einflußgrößen

Abschließend sollen in diesem Abschnitt einige Einflußfaktoren genannt werden, die in der obigen Systematik noch keine Berücksichtigung gefunden haben.

6.1. Das Kantenarbeitsvermögen

Beim Sturzversuch wurde bereits das Problem der Seilumlenkung angerissen; dort wurde als Kante ein genormter Karabiner verwendet. Auch im Zerreißversuch wurde eine Kantenumlenkung gemessen, bei der sehr deutlich wurde, daß die Kantenbruchkraft geringer ist als die Höchstbruchkraft.

Nun gilt für die Praxis des Kletterns die Regel, alle natürlichen Sicherungsmöglichkeiten auszunutzen, wie es auch in einem Lehrbuch empfohlen wird. Wie aber verhält sich das Seil, wenn es bei einem Sturz über eine scharfe Kante läuft?

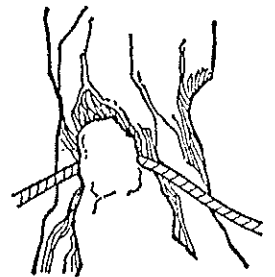
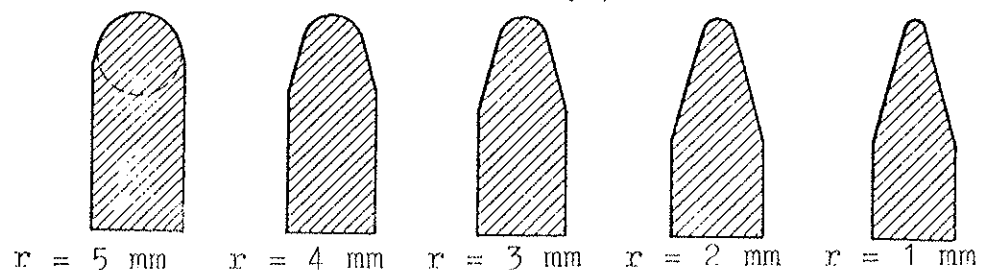


Abb. aus (12)

Zu diesem Problem hat der DAV einige Versuche durchgeführt: zum einen Normstürze über Metallkanten mit einem geringeren Kantenradius als $r = 5 \text{ mm}$; zum anderen über eine Granitkante mit einer Umlenkung von 90° .

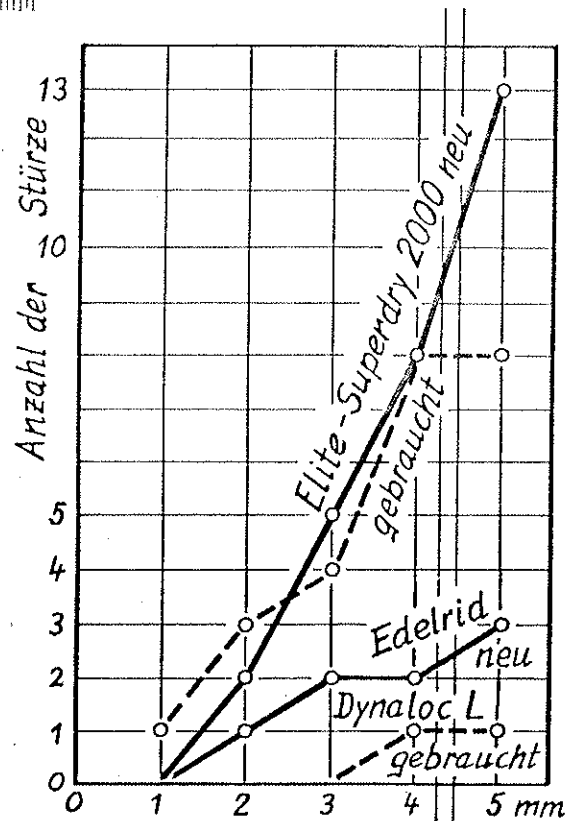
Abb.: Metall-Umlenkkanten nach (8)



Das abgebildete Diagramm (aus (8)) zeigt die Ergebnisse der Sturzversuche über verschiedene Metallkanten.

Sie lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- 1) Je schärfer die Kante ist, desto weniger Stürze hält das Seil; das Kantenarbeitsvermögen nimmt also rapide ab.
- 2) Je qualitativ besser das Seil ist, desto höher ist die Sicherheitsreserve.

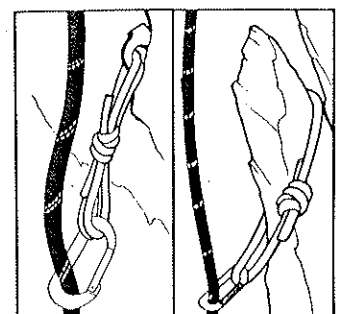


- 3) Die Sicherheitsreserve eines gebrauchten Seils ist immer geringer als die eines neuwertigen Seils.

In jedem Fall gilt: bei einem Sturz über eine Kante von $r = 1$ mm reißt jedes, auch das beste Seil. (Der eine gehaltene Sturz des gebrauchten Elite-Seils wurde dadurch ermöglicht, daß schon vorher der Mantel geplatzt war und die Litzen sich über die Kante verteilen konnten).

Die Sturzversuche über eine Granitkante haben ähnliche Ergebnisse gebracht, jedoch waren die Unterschiede zwischen qualitativ besseren und schlechteren Seilen nicht so gravierend, wie bei den Stürzen über eine Metallkante.

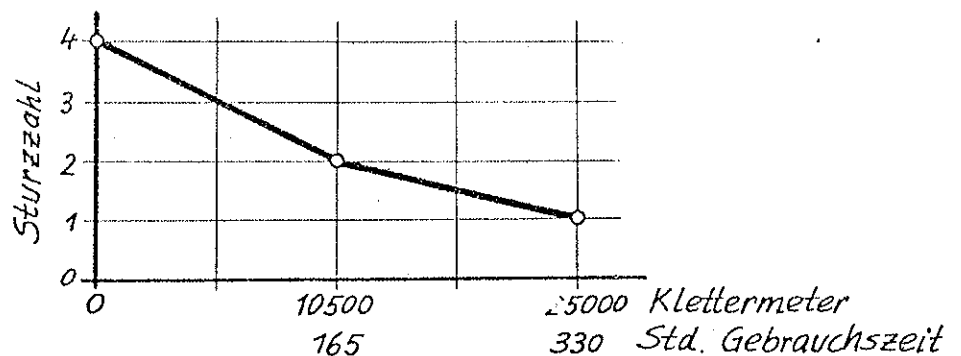
Nach diesen Ergebnissen empfiehlt es sich immer, eine Seilschlinge mit Karabiner als Zwischensicherung zu verwenden und einen direkten Fels-Seil-Verlauf zu vermeiden.



6.2. Seilalter und Arbeitsvermögen

Während der Kletterei wird das Bergseil ständig in einem unteren Lastbereich belastet, durch Abseilen, kleinere Stürze etc. Dadurch wird das Seil irreversibel gedehnt und verliert somit an Elastizität und Arbeitsvermögen, unterscheidet sich also in diesen wesentlichen Punkten von einem neuwertigen Seil. Welche Sicherheitsreserven kann nun ein gebrauchtes Seil im Vergleich zu einem neuwertigen noch bieten?

Dieses Verhältnis zeigt das folgende Diagramm, das aus Untersuchungen des DAV (8) stammt:



6.3. Sturzfaktor Mensch

In der Praxis des Sturzversuchs wird eine 80 kg schwere Eisenmasse als Sturzwert verwendet. Der menschliche Körper dürfte bei einem Sturz ins Seil jedoch anders reagieren, da bekanntlich alle Organe und Extremitäten bei einer abrupten Verzögerung elastisch reagieren und dadurch Fallenergie absorbieren. Die Frage ist nun, wieviel Energie der menschliche Körper im Vergleich zu einem starren Fallgewicht schlucken kann. Der DAV hat zu dieser Frage einen sehr leichten Sturz mit dem Sturzfaktor 0,5 und einer Sturzhöhe von 2 m durchgeführt. Dabei lag der Fangstoß des Eisengewichtes um 46,5% höher als der Fangstoß des Kletterers. Allerdings wird diese Differenz bei härteren Stürzen sicherlich geringer werden.

6.4. Thermische Bedingungen

Für alle normierten Seilversuche gelten die thermischen Bedingungen von 22° C und 65% relativer Luftfeuchtigkeit. In der Praxis allerdings wird nicht nur bei schönem Wetter geklettert, sondern eher bei niedrigen Temperaturen und bei Regen und Schnee, sodaß die Seile wesentlich kälter und zudem auch oft genug naß oder gar vereist sind. Zu diesem Problem gibt es nur wenige veröffentlichte Versuchsergebnisse, die zu dem Schluß kommen, daß Seile bei diesen Bedingungen in hohem Maße bruchgefährdet sind.

7. Resumee

Was könnte also ein Ergebnis dieser Überlegungen sein? Aufgrund der einander widersprechenden Eigenschaften, die Seile in sich vereinen müssen, kann es "das optimale Bergseil" nicht geben, sondern nur eine Kompromißlösung. Diese Kompromißlösung sollte sich an der zentralen Funktion des Bergseils, nämlich der Sturzsicherung, orientieren, d.h. es wird ein optimales Bremssystem gesucht, das die Sturzenergie absorbieren kann. Nach den theoretischen Überlegungen ist ein Reibungsbremssystem dazu besser in der Lage als die elastischen und dämpfenden Eigenschaften des Bergseils, sodaß eine verstärkte Weiterentwicklung der dynamischen Sicherung gefordert werden sollte, die dabei auch eine Reduzierung der utopisch hohen Sturzzahlen in Kauf nehmen kann, die in erster Linie wohl nur werbewirksamen Wert haben.

Für die Praxis wird ein Resumee wohl immer gleich aussehen: Die gesamte Sicherheitsausrüstung, einschließlich des Seils, ist heute sehr weit entwickelt und kann eine hohe Sicherheitsreserve bieten, gleichwohl empfiehlt es sich immer, einen schweren Sturz möglichst zu vermeiden.

LITERATUR

- (1) SCHUBERT, P.: Die Problematik moderner Anseilmethoden; DAV-Mitteilungen, 1975, S.72ff
- (2) WEIDEMANN, G.: Sturzenergie und Fangstoß
DAV-Mitteilungen; 1975; S. 229ff
1976; S. 21ff; S. 128ff; S. 191ff; S. 250ff
- (3) UIAA (Union internationale des associations d'alpinisme); Bulletin No 85; 1979
- (4) INSTITUT für FÖRDERTECHNIK, Universität Stuttgart; Praktikumsversuch: Prüfungen an einem Bergseil; Versuchseinleitung, Versuchsprotokoll.
- (5) LANDES, E.: Der Sturzfaktor; DAV-Mitteilungen; 1974; S. 182
- (6) WALLNER, E.: Der Einfluß der Umlenkkante auf das Bergseil; Verband alpiner Vereine Österreichs; Wien 1958
- (7) SICHERHEITSKREIS im DAV: Tätigkeitsbericht 1969 - 70
- (8) SICHERHEITSKREIS im DAV: Tätigkeitsbericht 1974 - 79
- (9) JUILFS, J.: Zum Dehnverhalten von Fasern, Fäden und Garnen I und II; Schweizer Archiv; Solothurn, April und Mai 1972
- (10) STICHT, F.: Wie sicher sind Bergseile?
Der Bergsteiger, März 1980, München
- (11) EDELRID: Seilkunde; Isny/Allgäu
- (12) HUBER, H.: Bergsteigen heute; München; ⁴1978