

Dehnung und Elastizität in Baumpflege und SKT*

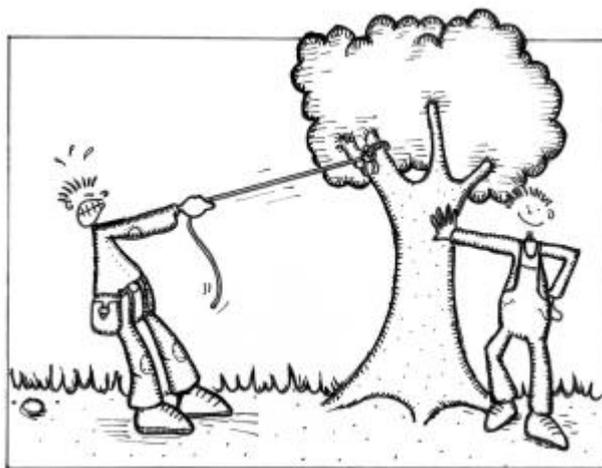
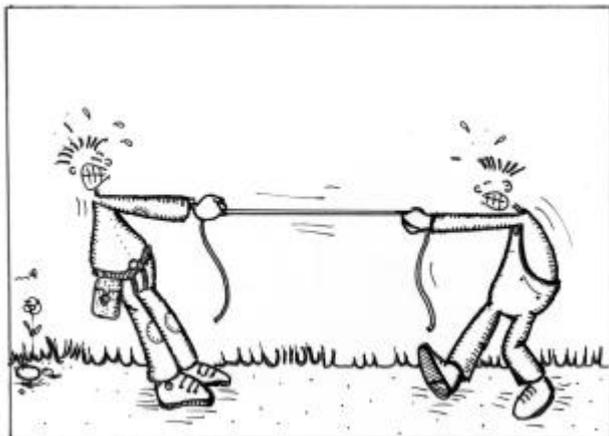
Grundlegende physikalische Zusammenhänge beeinflussen die Sicherheit von Kletter- und Ablasstechniken ebenso wie die Stabilität des Baumes und die Verwendung baumpflegerischer Hilfsmittel. Die Dehnbarkeit des eingesetzten Materials und die Elastizität der Strukturen, mit denen Baumpfleger täglich arbeiten, beeinflussen sowohl die eigene Gefährdung und Belastung beim Klettern als auch Effizienz und Sicherheit der durchgeführten Maßnahmen.

In diesem Beitrag wird die Wirkungsweise der mechanischen Eigenschaften von Seil- und Gurtmaterial sowie dem grünem Holz der Bäume im Zusammenhang mit Klettertechnik, Ablass- sowie Kronensicherungsarbeiten dargestellt.

Kraft und Gegenkraft

Wenn sich ein Körper in Ruhe befindet oder mit konstanter Geschwindigkeit bewegt, gibt es zu jeder Kraft eine gleich große Gegenkraft. Dieses Erkenntnis von Sir Isaac Newton zeigt sich zum Beispiel, wenn zwei beim Tauziehen nicht vorankommen und mehr oder weniger in einer Position verharren, weil sie gleich stark sind. Interessanterweise ist es für die Spannung im Seil egal, ob an beiden Seiten ein Mensch mit aller Kraft zieht, oder ob sich lediglich auf einer Seite jemand abmüht, während der andere das Seil inzwischen am Baum festgebunden hat.

Abb. 1 Wo herrscht die größere Spannung im Seil?



Zeichnungen von M. GRADL, verändert nach ROMBERG & HINRICHS: Keine Panik vor Mechanik, 2003

Hängt ein Kletterer am Ast, muss seiner Gewichtskraft auch eine gleich große Haltekraft entgegenwirken – sonst würde er herunterfallen. Diese Gegenkraft wird vom Seil übertragen, aber woher kommt sie eigentlich? Was den Kletterer letztendlich hält, ist das Gewicht der Wurzelplatte und die Verankerung der Wurzeln im Boden. Über Ast, Stamm und Wurzeln aber wird die Gegenkraft aufgebaut. Genauso stemmen sich die beiden Herren beim Tauziehen mit ihrem Gewicht und der Reibung ihrer Fußsohlen gegeneinander – und kommen beim Erzeugen der dazu erforderlichen Kräfte ganz schön schwitzen. Nun fragt man sich doch, wie denn der Baum Kräfte hervorbringt – Muskeln besitzt er ja schließlich nicht.

Dehnung

Wäre der Baum völlig starr und steif, würde der arme Kerl in Abbildung 1 direkt gegen das Gewicht der Wurzelplatte ankämpfen. Aber ein Ast biegt sich z.B. unter der Last eines Kletterers durch, seine Fasern verformen sich. Das gleiche gilt für den Stamm und die Wurzeln, nur ist das mit bloßem Auge nicht mehr zu erkennen. Durch diese (noch so kleine) Verformung erst wird im Holz eine Spannung erzeugt, die letztendlich die Gegenkraft hervorbringt. Die Dehnung der Fasern liefert auch die nötige Energie, um gleich einem gespannten Bogen wieder in die Ausgangslage zurückzuschwingen, wenn der Kletterer wieder am Boden ist.

Holz ist ein elastisches Material, das heißt, es kann sich unter Belastung dehnen und stauchen. Ohne diese Biegung könnte ein Ast das Gewicht eines Kletterers nicht halten – wäre er nicht flexibel, müsste er unter Last brechen. Die meisten Stoffe, mit denen wir Menschen umgehen, verhalten sich elastisch wie die Holzfasern im Ast. Selbst Stahl und Kristalle können gedehnt und gestaucht werden, allerdings ist die Verformung viel geringer und wird daher erst bei viel größeren Kräften messbar. Daher bleiben uns ihre elastischen Eigenschaften meist verborgen.

Nur wenige Stoffe sind spröde und brechen rasch, statt sich zu dehnen. Sie können kaum Biegebelastungen aushalten. Ein Teller aus Keramik ist zum Beispiel nicht elastisch und zerbricht, wenn er auf den Boden fällt – obwohl er druckfest genug ist, um dem Frühstücksmesser zu widerstehen. An einem Tonbalken sollten Kletterer daher nicht ankern. Beim kleinsten Sturz würde er zerbrechen.

Bei Biegung eines Astes entsteht auf der Unterseite Druckspannung und auf der Oberseite Zugspannung. Wenn auf einen Körper äußere Kräfte einwirken, entsteht im Inneren Spannung. Diese steigt, wenn die gleiche Kraft sich auf einen kleineren Querschnitt verteilt. Ein einleuchtendes Beispiel liefert der Druckschmerz, den auch eine durchaus zierliche Frau verursachen kann, wenn sie uns mit Pfennigabsätzen auf die Füße steigt. Die Pein wäre spürbar geringer, würde sie dabei ihre ausgetretenen Hauspantoffeln tragen.

Zurück zum Ast und dem daran immer noch hängenden Kletterer. Durch die auftretenden Spannungen werden die Randfasern des Astquerschnitts also oben gedehnt und unten gestaucht. Verfolgt man diesen Vorgang bis auf die Ebene der Moleküle, lässt sich erkennen, wie durch Dehnung Gegenkraft aufgebaut und Energie gespeichert werden kann.

Im Molekülgitter, aus dem letztendlich jeder Feststoff besteht, haben die Moleküle einen festen, natürlichen Abstand zueinander, der von der Temperatur und dem inneren Spannungszustand des Werkstoffes abhängt. Sie werden dort von verschiedenen Kräften in Position gehalten.

Abb. 2 Molekülgitter

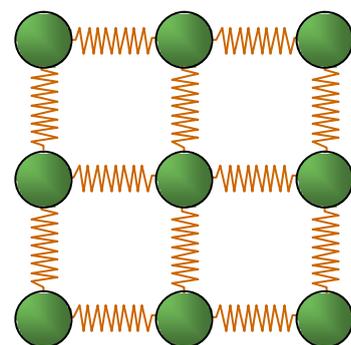
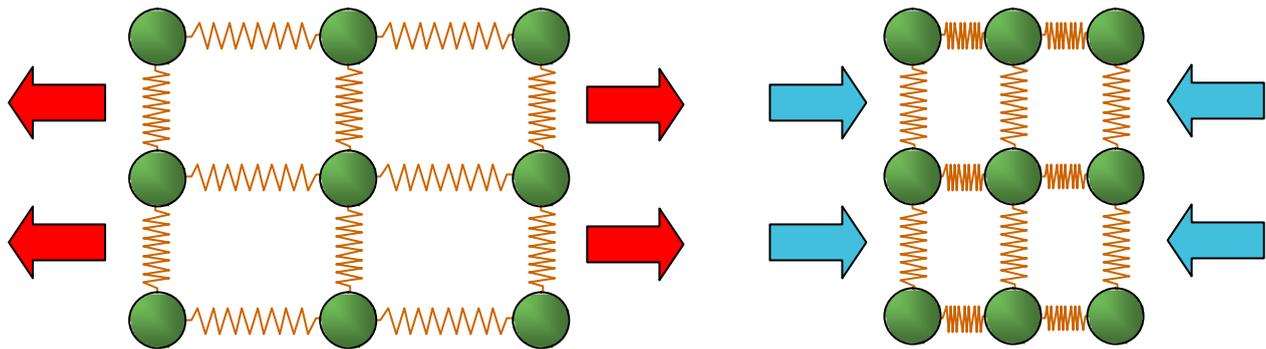


Abb. 2 und 3 nach GORDON, The New Science of Strong Materials, 1968

Wird die Holzfasern nun gedehnt, vergrößert sich notgedrungen auch der Abstand der Moleküle zueinander. Wie Sprungfedern ziehen die molekularen Kräfte die Teilchen zurück, damit sie wieder ihre ursprüngliche Position einnehmen. Das gleiche passiert bei Druck: Das Gitter wird gestaucht, und die Moleküle müssen näher aneinanderrücken. Wieder wirken die Molekularkräfte dem entgegen, die Teilchen stoßen sich ab und erzeugen so eine Gegenkraft. Ist die Krafteinwirkung zu Ende, springen sie wie eine zusammengedrückte Feder in ihre ursprüngliche Position zurück.

Abb. 3 Verformung durch Zug und Druck



Zwar sind die einzelnen Kräfte zwischen zwei Teilchen sehr klein, aber in der Summe der unzähligen Moleküle in einer Holzfaser entstehen doch ausreichend große Kräfte. Im Holz wirkt sich zudem auch noch die spirالية Struktur der Zellwände auf die gesamte Dehnbarkeit aus. Im Grunde kommt der Ast also nicht ins Schwitzen, aber anstelle der Muskeln geraten sozusagen seine Moleküle unter Druck. Durch ihre Abstoßung bzw. Anziehung entsteht bei Verformung die Gegenkraft, die erforderlich ist, um das Gewicht des Kletterers zu tragen.

Elastizität

Je nachdem, wie stark die molekularen Kräfte sind, lässt sich ein Körper mehr oder weniger leicht verformen. Als Maß für die Dehnbarkeit eines Materials dient der sog. Elastizitäts-Modul, auch Steifigkeit genannt. Zum Beispiel bezeichnet diese Größe den Unterschied zwischen elastischen und statischen Seilen - sie drückt aus, wie viel Kraft aufgewendet werden muss, um eine bestimmte Dehnung zu bewirken.

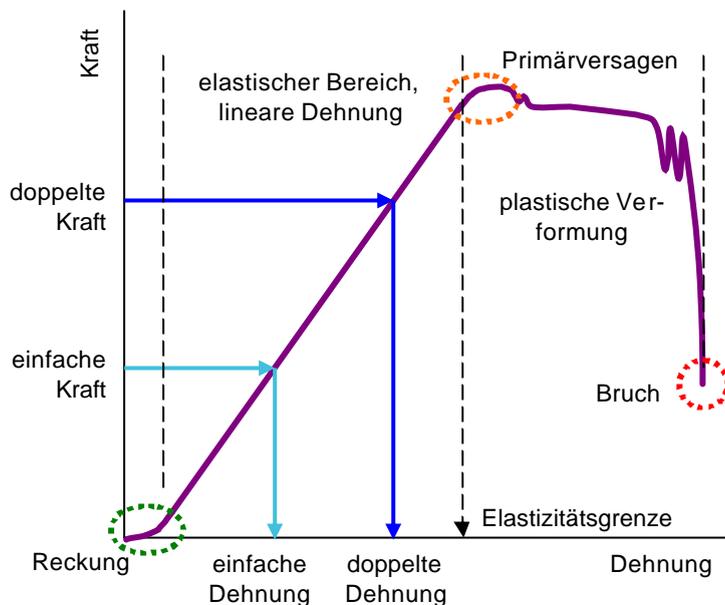
Bei Seilen spricht man hier auch vom Seilmodul – je größer dieser Wert, desto steifer ist das Seil, desto stärker muss es belastet werden, um eine bestimmte Dehnung zu erreichen. Die erreichte Dehnung ist von der Seillänge abhängig – je länger das Seil, um so größer ist der gesamte Dehnungsweg.

Das macht sich beispielsweise bei sehr kurzen Kronensicherungen bemerkbar. Ist eine bestimmte Schwingungsbreite bei Niedriglast erwünscht, nützt die Dehnbarkeit des Seiles selbst nicht viel. 5% Dehnung auf 1 m Länge sind nun mal nur 5 cm maximaler Freiraum, und das bei mehreren Tonnen Belastung. Hier helfen nur federnde Elemente wie z.B. der Ruckdämpfer im System cobra. Umgekehrt kann große Dehnbarkeit bei längeren Verbindungen zu ungewollt großen Bewegungsspielräumen führen. Bei 7,5 m Länge wird mit 20% Dehnbarkeit unter Vollast ein Dehnungsweg von 1,5 m erreicht – das könnte im Einzelfall bereits so viel sein, dass am Astan-satz primäres Bruchversagen durch Überdehnung eintritt.

Die Dehnungseigenschaften eines Seiles bleiben im sog. „elastischen Bereich“ gleich. Seile können sich aber auch dauerhaft verformen, wenn sich z.B. bei einem neuen Seil zunächst alle Fasern durch Reckung vollständig ausrichten. Daher sagt der Seilmodul fabrikneuer Seile nur bedingt etwas über ihr Dehnungsverhalten im täglichen Gebrauch aus.

Bei starker Belastung können Seile wie Holzfasern auch über den Punkt des Primärversagens gedehnt werden. Hier beginnt die „plastische“ Verformung, die nicht umkehrbar ist. Die Fasern beginnen zu kriechen, wobei das Seil rasch messbar länger wird (vgl. Abb. 4). Gleichzeitig nimmt die Festigkeit der Fasern drastisch ab, und die Bruchlast des Seiles kann sich bereits vor dem endgültigen Zerreißen gefährlich vermindern.

Abb. 4 typisches Kraft-Dehnungs-Diagramm eines Kunststoffseiles



Während bei einem Holzstamm die Form des Querschnitts darüber entscheidet, wie viele Fasern der Druckkraft entgegenwirken und welche Spannung entsteht, ist im Seil die Spannung zunächst überall gleich groß. Dies gilt jedoch nur, solange sich der Durchmesser nicht ändert und immer die gleiche Anzahl von Seilfasern an der Lastabtragung beteiligt sind. Nach Schäden am Seil muss die gleiche Kraft von weniger Fasern übernommen werden. An einer solchen Schwachstelle wird durch die erhöhte Spannung früher die Grenze der Zugfestigkeit erreicht.

Spannenergie

Dehnbare Materialien nehmen Energie auf, wenn sie gespannt werden. Dies lässt sich anschaulich darstellen, wenn man versucht, ein Gummiband unter voller Spannung durchzuschneiden. Der elastische Gummi gibt die beim Dehnen gespeicherte Energie schlagartig wieder frei – was mitunter schmerzhaft enden kann. Anders verhält es sich z.B. mit einer stark gespannten Paketschnur, die viel weniger dehnbar ist, und beim Zerschneiden nicht zurückfedert.

Die sog. Spannenergie hängt einerseits von der aufgebrachten Kraft und andererseits vom erreichten Dehnungsweg ab, also um welche Strecke sich z.B. ein Seil unter Einwirkung der dehnenen Kraft verformen lässt. Diese Faktoren bestimmen aber gleichzeitig auch die Elastizität des Seiles (vgl. oben). Die Fähigkeit, Spannungsenergie aufzunehmen, ergibt sich also aus der Steifigkeit des Materials und seiner Form.

Die Elastizität der verwendeten Ablasseeile ist dafür verantwortlich, dass der Fangstoß beim Rigging auch beim Blockieren des Bremsgeräts gemindert werden kann. Indem sie sich verformen, nehmen die Fasern des Seiles Energie auf und dämpft auf diese Weise die auftretenden Kraftspitze (vgl. dazu „Was Sie schon immer über den Fangstoß beim Abseilen wissen wollten“ im Kletterblatt der Münchner Baumkletterschule 2005).

flexible Materialien

In der SKT haben flexible Materialien viele Vorteile, aber auch einige Nachteile. Insbesondere beim Klettern in der Krone bieten dehnbare Seile ein gewisses Sicherheitspolster für eventuelle Stürze. Sie können nämlich ebenso wie Ablasseeile die Sturzenergie sanfter abfedern. Das gleiche Prinzip nutzen Ruckdämpfer bei der Kronensicherung, um ein abruptes Abstoppen der Stämmlinge beim Zurückschwingen zu verhindern. Die reine Seildehnung und der Durchhang wären dafür vielfach nicht ausreichend.

Andererseits wirkt sich die Flexibilität nachteilig aus, will man sich beim Aufstieg möglichst kraftsparend bewegen. Für solche Einsätze sind statische Seile von Vorteil, da kaum Energie in Seil-
dehnung investiert werden muss. Beim Heben von Lasten mit einem Seilzug setzt man sogar
Stahlseile oder Ketten ein, um die Dehnung möglichst gering zu halten. Da hier wenig Spann-
energie im Seil gespeichert wird, kann die erforderliche Kraft mit geringerem Arbeitseinsatz über-
tragen werden.

Durch ausgefeilte Körpertechnik lässt sich die Flexibilität des Seiles aber auch nutzen, um sich
beim Aufstieg am Einfachseil mit jedem Rückfedern des Seiles dynamisch wieder ein Stück an-
heben zu lassen. Dabei entstehen jedoch erhöhte Spitzenbelastungen im Ankerpunkt, die ein
Vielfaches des Körpergewichtes betragen können. Beim Aufstieg am klassischen Einfachseil tritt
zudem verstärkte Reibung am Ankerpunkt auf. Diese kann sowohl die Borke als auch die Seilfa-
sern schädigen. Aus diesem Grund sollte auch beim Aufstieg am Einfachseil immer ein fester
Ankerpunkt installiert werden.

steife Materialien

Den Vorteilen beim Einsatz von nahezu statischen Aufstiegsseilen stehen erhöhte Risiken im
Falle eines Sturzes gegenüber. Bei Versuchen von Mark Bridge und Jelte Buddingh hat sich her-
ausgestellt, dass bereits bei geringen Sturzhöhen durchaus das 12-fache des Eigengewichts als
Fangstoß auftreten kann, wenn Klemmen als Aufstiegsgeräte eingesetzt werden.

Selbst mit einem halbstatistischen Kletterseil wurde bei eigenen Untersuchungen durch leichtes
Zurückfallen ins Seil (z.B. ein kurzes Abrutschen beim Footlocking) eine Seilbelastung in Höhe
des vierfachen Körpergewichtes gemessen. Die Verminderung der Dehnung auf quasi Null, bei-
spielsweise durch den Einsatz von sehr steifen Seilen aus hochbelastbaren Spezialfasern, könn-
te dazu führen, dass dieser Wert drastisch ansteigt.

Abb. 5 Aufstieg mit Footlock-Technik



Besondere Vorsicht erfordert der Einsatz solcher Hochleistungsfasern bei Ablassarbeiten. Beim
Heben von Lasten sowie beim Steuern dynamischer Ablassvorgänge sind sie den bisherigen
halbstatistischen Arbeitsseilen wohl klar überlegen. Wird das Bremsgerät aber einmal (bewusst
oder versehentlich) blockiert, kann die geringe Seildehnung zu enormen Fangstößen führen.

Das Ablasseil wird aufgrund seiner hohen Bruchbelastbarkeit durchaus in der Lage sein, diese sicher abzutragen. Am Ankerpunkt jedoch wird sich die Belastung im schlimmsten Fall nahezu verdoppeln. Dann könnten unter Umständen hohe Belastungen an Blockrolle, Augschlinge oder Ankerpunkt auftreten. An dieser Stelle sollte also auf eine ausreichende Dimensionierung des Materials und eine entsprechende Tragfähigkeit des Stammes geachtet werden.

Stahlseile und Kunststoffe mit geringer Elastizität werden mittlerweile nur noch gezielt und in Sonderfällen als Kronensicherung eingebaut. Ähnlich bietet der Einsatz von hoch belastbaren Spezialeilen mit geringer Dehnung beim Rigging in bestimmten Situationen Vorteile. Dann sollte aber der Ankerpunkt durch besondere Vorsichtsmaßnahmen so gewählt und gestaltet werden, dass er die beim Blockieren des Bremsgerätes eventuell auftretenden Belastungen abtragen kann. Hierzu kann im Voraus eine Abschätzung des Fangstoßes z.B. mit Hilfe der Spezialsoftware Rigging 1.0 sehr hilfreich sein.

Literaturtipps

- Brudi, E., Detter, A., Bischoff, F.: Neue Schulungssoftware Rigging 1.0, Kletterblatt Münchner Baumkletterschule 2004
Detter, A., Brudi, E., Bischoff, F.: Kronensicherungen - was bewirkt der Durchhang des Seiles?, Kletterblatt Münchner Baumkletterschule 2004
Detter, A., Brudi, E., Bischoff, F.: Was Sie schon immer über den Fangstoß beim Abseilen wissen wollten (und sich nur nie zu fragen trauten), Kletterblatt Münchner Baumkletterschule 2005
Donzelli, P.: Engineering Concepts for Arborists, Arborist News, Feb. 1998
Donzelli, P. & Lilly, S. w. ArborMaster Training Inc.: The Art and Science of Practical Rigging, International Society of Arboriculture, 2001
Gordon, J.E.: Strukturen unter Stress, Spektrum der Wissenschaft, 1987
Steinfath, M.: Baumpflege Praxis : Dynamische Fallszenarien, AFZ - Der Wald 4/2005

Formelsammlung

Das Biegemoment M_B , das durch einen Kletterer an einem Ast aufgebracht wird, berechnet sich aus seiner Masse m , der Erdbeschleunigung g und der Hebelarmlänge l . In diesem Fall zählt nur die Komponente der Gewichtskraft, die senkrecht zur Längsachse des Astes wirkt. Um andere Lastwinkel erfassen zu können, muss der Winkel α zwischen der lotrecht wirkenden Gewichtskraft und der Achse des Astes berücksichtigt werden.

$$M_B = m \cdot g \cdot l \cdot \sin \alpha$$

Die Spannung S (sigma) in den Randfasern eines Astes errechnet sich aus dem Biegemoment M_B und dem Widerstandsmoment W , das sich aus Form und Durchmesser des Astes ergibt. Das Widerstandsmoment W für einen runden Astquerschnitt wird von seinem Durchmesser d in der dritten Potenz und der Kreiszahl π (pi) bestimmt.

$$S = M_B / W \quad \text{mit } W = d^3 \cdot \pi / 32$$

Da der Durchmesser in der 3. Potenz eingeht, ist ein doppelt so dicker Ast demnach achtmal so widerstandsfähig, wenn seine Randfasern genauso druckfest sind ($2^3 = 8$).

Den Elastizitätsmodul E der Holzfasern auf Druck oder Zug parallel zur Faser beschreibt der Quotient aus der aufgebrachten Spannung S und der erreichten relativen Dehnung e (epsilon). Diese ist das Verhältnis von Dehnungsweg ΔL (delta L) zu Grundlänge L . Die Spannung S ist definiert als wirkende Kraft F geteilt durch die Fläche A des Querschnitts.

$$E = S / e \quad \text{mit } e = \Delta L / L \text{ und } S = F / A$$

Die Dehnungsarbeit oder Spannenergie E_{spann} in einem Seil lässt sich auf zwei Arten darstellen: einmal als Produkt aus mittlerer dehnender Kraft F und erreichtem Dehnungsweg ΔL , zum anderen als Produkt aus halbem Seilmodul K und relativer Dehnung e zum Quadrat.

$$E_{\text{spann}} = \frac{1}{2} \cdot F \cdot \Delta L = \frac{1}{2} K \cdot e^2$$