

Konstruktion, Leichtbau und Ökonomie bei Pflanzen

Ulrich Kull und Astrid Herbig (Stuttgart)

Zusammenfassung

Die Festigkeitseigenschaften von Achsen aus Pflanzenarten unterschiedlicher Stellung werden mit Hilfe der Bic-Methode (nach F. OTTO) beschrieben und zu Energiegrößen in Beziehung gesetzt. Damit lassen sich Aufwandswerte K (dimensionslos) berechnen, die dann auf die Lebensdauer der Achsen bezogen werden. Konstruktiv gute Wirtschaftlichkeit zeigen Achsen vom Bautypus der Gräser, Blattstiele von Farnen und Achsen vom Hopfen (Liane). Der K -Wert ausdauernder Achsen liegt höher, K /Lebensdauer ist aber ähnlich wie bei einjährigen. Kurzlebige Blüten- und Fruchtsiele haben einen hohen Aufwand je Zeit. Die Größe K /Lebensdauer wird in Verbindung mit der Selektion gebracht; Vergleiche mit menschlichen Konstruktionen schließen sich an.

Abstract

The mechanical stability of species of different systematic position is described using the Bic-method (of F. OTTO). The Bic-values multiplied by the energy values of the stems result in constructive consumption values, K (dimensionless). Low K -values are found for stems of the grass type, the rachis of fern-leaves and stems of hop (liana). K -values of perennial stems are higher, but on the basis of their lifetime they are similar to those of annual species. The short-lived stems of flowers and fruits show high K -values, especially when based on their lifetime. The correlation between the calculated values and natural selection is discussed; comparisons with human constructions are made.

Untersuchungen der Festigkeitseigenschaften pflanzlicher Gewebe werden schon seit dem vorigen Jahrhundert durchgeführt. Viele der klassischen Befunde, vor allem von SCHWENDENER und RASDORSKY, sind in Tabellenwerke und Lehrbücher eingegangen. Intakte Organe im lebenden Zustand sind bisher allerdings bei Pflanzen kaum quantitativ untersucht worden; schon deshalb nicht, weil sie heterogen (anisotrop) aufgebaut sind. In der Technik bezeichnet man Strukturen, die ihre Trageleistung mit geringem Massen- bzw. Energieaufwand erbringen, als Leichtbauweise. Bei Pflanzen erbringen vor allem Sprossachsen die Trageleistung. Man kann, um das Prinzip Leichtbau in diesen Fällen zu erfassen, auf die Pflanzen den methodischen Ansatz von F. OTTO anwenden, wonach die Leistungsfähigkeit einer Konstruktion aufgrund des Bic-Wertes beurteilt wird, der das Verhältnis von aufgewandter Masse zum Produkt aus belasteter Kraft mal zugehöriger Übertragungstrecke im Versagensfall angibt:

$$\text{Bic} = \frac{\text{Masse}}{\text{Kraft} \times \text{Weg}} \quad \left[\frac{\text{g}}{\text{Nm}} \right]$$

Ein geringer Bic-Wert bedeutet hohe Effektivität und alle Objekte einer Klasse, die niedrige Bic-Werte aufweisen, können als "Leichtbau" bezeichnet werden. Der Bic-Wert ist abhängig von Material, Belastungsart und Form des Objekts; er wird üblicherweise daher bezogen auf dessen relative Schlankheit $\lambda = \frac{\text{Weg}}{\sqrt{\text{Kraft}}}$.

Mit diesem Ansatz ist es möglich, Festigkeitseigenschaften lebender Pflanzenteile zu bestimmen und durch eine große Zahl von Einzelmessungen statistisch abzusichern.

Der nächste Schritt ist die Bestimmung des Aufwand/Nutzenverhältnisses, also der Wirtschaftlichkeit oder Ökonomie der Konstruktion. Biologisch gesehen ist dieser Kostenfaktor der zur Herstellung der tragenden Masse erforderliche Energieaufwand. Um ihn zu bestimmen, mißt man zunächst den Energieinhalt der betreffenden Pflanzenteile (durch Kalorimetrie), ferner die Aschegehalte, Stickstoffgehalte

und Reservestoffgehalte. Dann berechnet man den Energieinhalt der Reservestoffe und subtrahiert ihn vom Gesamtenergieinhalt; dies liefert den Energieinhalt der tragenden Masse. Mit den Meßdaten kann man ferner in einem Näherungsverfahren (WILLIAMS et al., 1987) den Energieaufwand bestimmen, d. h. die Energiemenge, welche die Pflanze aufgewendet hat, um die zum Zeitpunkt der Messung vorliegende Masse und Gestalt des Organs zu erreichen. Dieser Energieaufwand wird als "construction cost" bezeichnet.

Multipliziert man die Bic-Werte mit dem Energieinhalt bzw. der construction cost (gemessen in kJ/g), so erhält man eine dimensionslose Größe K ($K = \text{Bic} \times E$), den konstruktiven Aufwandswert oder Aufwandskennzahl. Diese kann verglichen werden mit der konstruktiven Wirtschaftlichkeit bei der Errichtung eines Bauwerks. Je kleiner der Wert, um so geringer der Aufwand zur Erreichung der vorgegebenen Belastbarkeit.

Der Energieaufwand verschiedener Pflanzenarten zur Produktion tragender Substanz gleicher Leistung kann verschieden sein, bedingt z. B. durch unterschiedliche Effizienz des Photosynthese-Apparats. Näherungsweise kann man diese Effizienz der Energiewandlung entnehmen aus der Differenz zwischen dem gemessenen Energieinhalt und der berechneten construction cost eines Organs; diese Differenz kann als energetische Effizienz bezeichnet und ebenfalls als Energiegröße verwendet werden.

Schließlich ist bei Pflanzen die sehr unterschiedliche Lebensdauer in Betracht zu ziehen: jede Konstruktion ist für eine bestimmte Zeit vorhanden, wie schon die Unterscheidung einjährige/ausdauernde Arten erkennen läßt. Daher ist es sinnvoll, den konstruktiven Aufwandswert K auf die Zeit zu beziehen. - Hier besteht ein grundlegender Unterschied zu Leistungen der (menschlichen) Architektur: eine Pflanze muß real in der Zeit existieren, um für die weitere Evolution eine Bedeutung zu haben. Ein Bauwerk muß (zumindest seit Beginn der Neuzeit) nicht unbedingt wirklich existieren, um baugeschichtliche Wirkungen zu zeigen

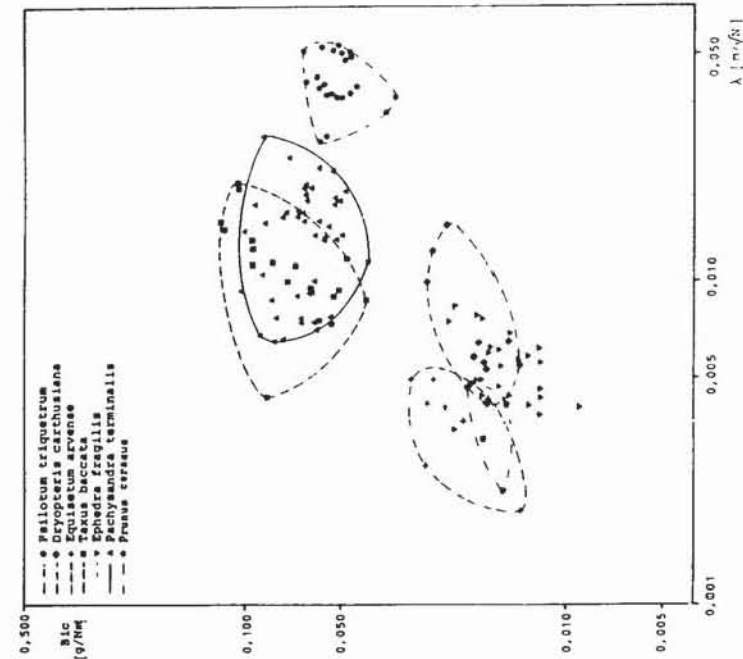
- dies mag durch die Namen BOULLEE, LEDOUX, SCHINKEL belegt sein.

Die Auswahl der untersuchten Objekte erfolgte nach mehreren Gesichtspunkten:

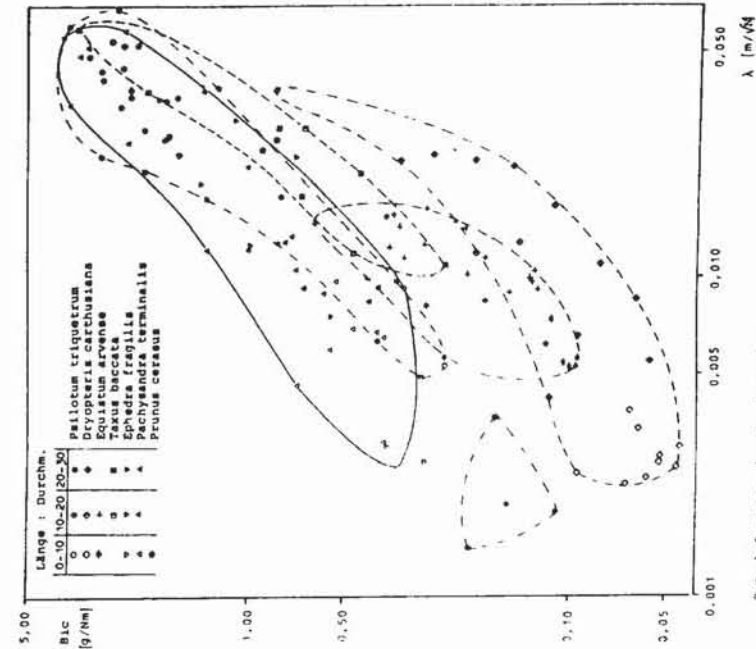
- Verfügbarkeit von Material bzw. schon vorliegende Energiewerte.
- Pflanzen unterschiedlicher systematischer und damit phylogenetischer Stellung (Farnpflanzen, Nacktsamer, Bedecktsamer; bei den echten Farnen wurden die Hauptachsen der Wedel (Rhachis) verwendet).
- Einjährige und mehrjährige Arten; unter den letzteren ein Fall mit stark verholzenden Achsen (Eibe) und ein Fall mit schwacher Verholzung (Pachysandra).
- Achsen unterschiedlicher Funktionen in der Pflanze: neben normalen blatttragenden Sproßachsen auch Blüten bzw. Fruchtsiele (Alpenveilchen, Löwenzahn, Kirsche).

Als Belastbarkeitsgrößen wurden zunächst Zug- und Druck-Bic-Werte gemessen; diese gemeinsam erlauben auch Aussagen zum Biegeverhalten (letzteres wurde experimentell noch nicht behandelt, aber Biegung besteht aus Zug- und Druckanteilen in der Achse und ist damit eine zusammengesetzte Größe).

Als Energiewerte wurden in die Berechnungen eingesetzt: Energieinhalt der tragenden Masse, construction cost, energetische Effizienz. In den meisten Fällen zeigen die so erhaltenen konstruktiven Aufwandswerte paralleles Verhalten. Dies kommt vor allem dadurch zustande, daß die Energiegrößen stark durch die chemischen Eigenschaften des Baumaterials der Landpflanzen bestimmt sind und daher nicht beliebig schwanken können (vgl. PIPP u. LARCHER, 1988). Der konstruktive Aufwandswert K wird also stärker durch die mechanische Leistung als durch die Energiegröße bestimmt. - Die K-Werte werden schließlich auf die natürliche Lebensdauer der entsprechenden Pflanzenteile bezogen (Tierfraß oder dgl., obwohl natürliche Vorgänge im Ökosystem, werden dabei ausgeschlossen).



Bic-A - Diagramm der Zugversuche.
Die Bic-Werte beziehen sich auf die Trockenmassen.



Bic-A-Diagramm der Druckversuche.
Die Bic-Werte beziehen sich auf die Trockenmassen.

BIC-WERTE (in g/Nm, bezogen auf das Trockengewicht)

| | ZUG | DRUCK |
|--------------------------|--------|--------|
| Einjährige | | |
| CYPERUS | 0,0086 | 0,0483 |
| BLECHNUM (Rhachis) | 0,0100 | 0,0445 |
| WURMFARN (Rhachis) | 0,0173 | 0,0544 |
| ACKERSCHACHTELHALM | 0,0570 | 0,134 |
| WALDSCHACHTELHALM | 0,0233 | 0,0905 |
| HOPFEN | 0,0191 | 0,0731 |
| SEEGRAS | 0,0265 | - |
| Ausdauernde | | |
| EIBE 1-jährig | 0,0419 | 0,127 |
| EIBE 2-jährig | 0,0375 | 0,0617 |
| PACHYSANDRA 1-jähr. | 0,0667 | 0,125 |
| PACHYSANDRA 2-jähr. | 0,0465 | 0,171 |
| PACHYSANDRA 3-jähr. | 0,0431 | 0,164 |
| EPHEDRA | 0,0168 | 0,062 |
| Blüten- und Fruchtstiele | | |
| ALPENVEILCHEN | 0,0536 | 0,112 |
| LÖWENZAHN | 0,0998 | 0,147 |
| KIRSCH (Fruchtst.) | 0,0177 | <0,10 |

Die Bic-Werte zeigen, daß besonders gute Konstruktionen sowohl bezüglich Druck als auch Zug sind: Achsen von Cypergras (*Cyperus alternifolius*, Bauform des Grastypus) und Rhachis vom Farn *Blechnum brasiliense*. Gute Werte zeigen die Achsen des Rutenstrauchs *Ephedra*, vom Hopfen (Liane) und die Rhachis vom Wurmfarn. Verholzende Achsen haben anfangs ungünstigere Bic-Werte; bei der Eibe werden diese mit der einsetzenden bzw. sich verstärkenden Holzbildung deutlich besser. Bei der nur schwach verholzenden *Pachysandra* erfolgt die Verbesserung zwar bezüglich Zug-, aber nicht für Druckbelastung. Man kann sich leicht überlegen, daß bei verholzenden Achsen mit normalem sekundären Dickenwachstum die zu erreichenden Grenzwerte die Bic-Werte des lebenden Holzes sein werden. Die drei untersuchten Blüten- bzw. Fruchtstiele liegen im oberen Bereich der gefundenen Variationsbreite; ihre Bic-Werte sind jenen junger Zweige der Eibe oder von *Pachysandra* vergleichbar. Einen schlechten Wert zeigt der Blütenstands-Stengel von Löwenzahn (obwohl hohl); der massive Blütenstiel des Alpenveilchens erweist sich als günstiger. Bezüglich der Zugbelastung weist der Fruchtstiel der Kirsche einen sehr kleinen Bic-Wert auf; dies ist aufgrund seiner Funktion, die hängende relativ schwere Frucht zu tragen, verständlich.

Die konstruktiven Aufwandswerte lassen sich mit den verschiedenen Energiegrößen berechnen. Die Werte sind aber - wie erwähnt - im Verhältnis zueinander ähnlich. Die kleinsten Werte, d. h. die Konstruktionen bester Wirtschaftlichkeit, besitzen die Achsen vom Cypergras und die Rhachis des Farns *Blechnum*. Gute Wirtschaftlichkeit haben auch der Rutenstrauch *Ephedra*, die Rhachis des Wurmfarns, die Achsen vom Waldschachtelhalm (demgegenüber ist die Achse des Ackerschachtelhalmes deutlich aufwendiger gebaut), von Hopfen und die achsenartigen Blätter vom Seegras *Posidonia oceanica*.

Der konstruktive Aufwand der mehrjährigen Achsen liegt deutlich höher; bei der Eibe sinkt der Wert mit zunehmendem Alter ab (vermutlich bis auf einen Grenzwert, der den

konstruktiven Aufwand der Holzbildung angibt). Bei der nur schwach verholzenden *Pachysandra* ist der Aufwand anfangs ebenfalls hoch und nimmt mit dem Alter bezüglich Zug, nicht aber bezüglich Druck, ab.

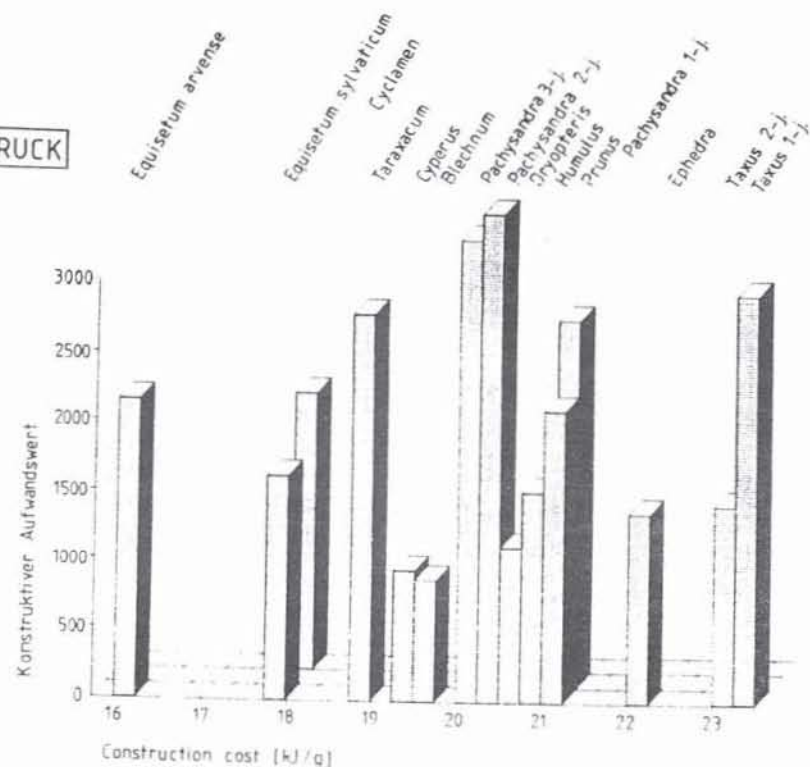
Der konstruktive Aufwand für die Blüten- und Fruchtstiele liegt in ähnlicher Höhe wie jener der ausdauernden Achsen. Bei der Kirsche wird auch bei den Aufwandswerten die Anpassung an die Zugbelastung erkennbar: der Aufwand für die Zugbelastung ist gering, bezüglich Druckbelastung aber schlecht. Beim Alpenveilchen ist der Aufwand für beide Belastungsarten ähnlich und immer noch deutlich geringer als beim Löwenzahn-Stengel.

Hinsichtlich Zugbelastung schwanken die konstruktiven Aufwandswerte zwischen günstigsten und ungünstigsten Konstruktionen etwa bis zum 8-fachen; bezüglich der Druckbelastung beträgt die Variationsbreite ungefähr das 3,5-fache.

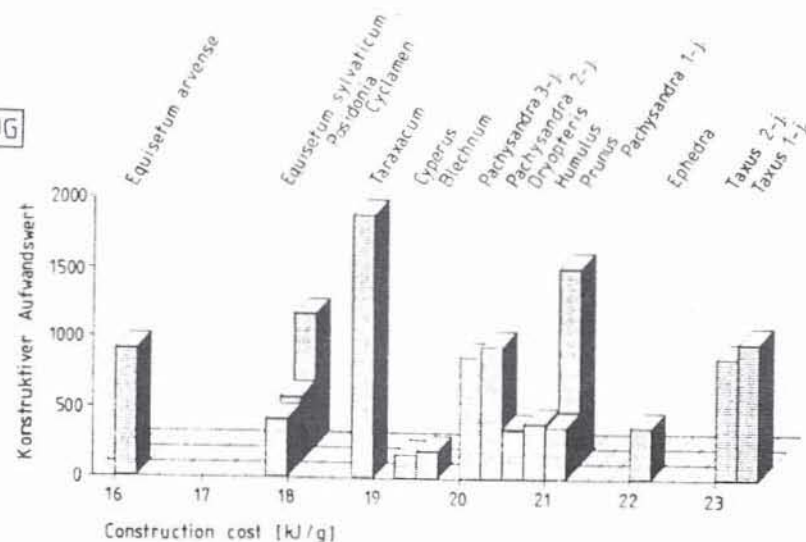
Da die Lebensdauer der untersuchten Tragesysteme sehr verschieden ist, muß der konstruktive Aufwand darauf bezogen werden. Berechnet man den konstruktiven Aufwandswert je Zeit, so gelangen die mehrjährigen Achsen in die gleiche Größenordnung wie die einjährigen. Schon bei den Schachtelhalmen ist der Einfluß der Lebensdauer zu erkennen: der weiche Waldschachtelhalm hat geringere Aufwandswerte als der längerlebige, stark verkieselte Ackerschachtelhalm. Aber bezogen auf die Zeit sind die Aufwandswerte beider fast identisch, für den Druck beim Ackerschachtelhalm sogar etwas günstiger.

Am kleinsten ist der Aufwand je Zeit für Zug- und Druckstabilität beim Cypergras, beim Farn *Blechnum* und bezüglich Zug auch beim Rutenstrauch *Ephedra*. Bei der Eibe wird der Aufwand je Zeit vom ersten zum zweiten Jahr kleiner und erreicht dabei Werte, die jenen der konstruktiv günstigen kürzerlebigen Arten entsprechen. Er würde sich dann - bei vergleichsweise sehr langer Lebensdauer der Achsen - kaum mehr ändern. Allerdings kann man bei verzweigten Bäumen in der Regel nicht voraussagen, welche Zweige (Achsen)

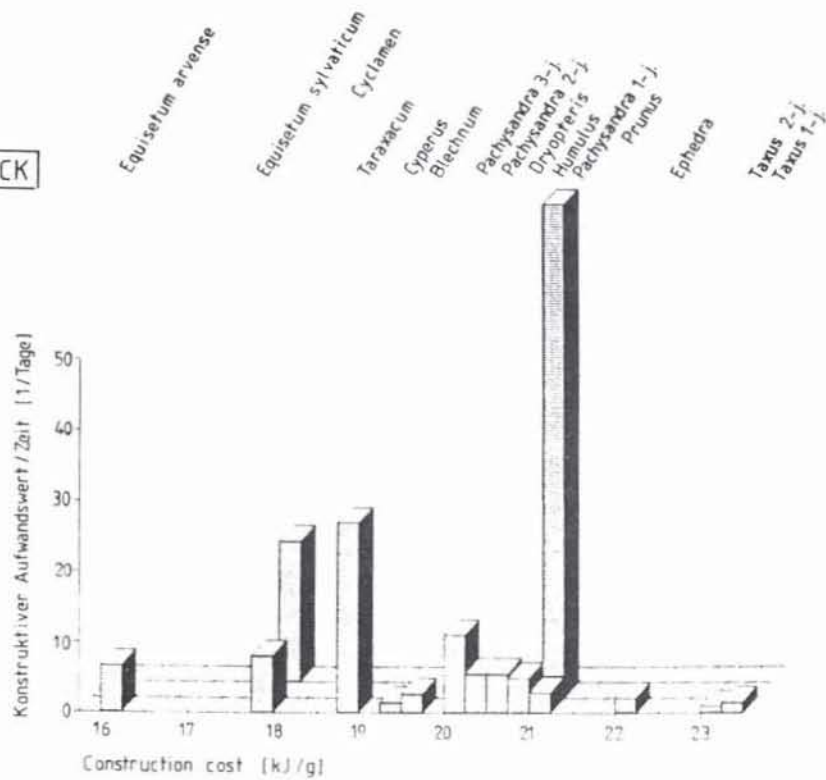
DRUCK



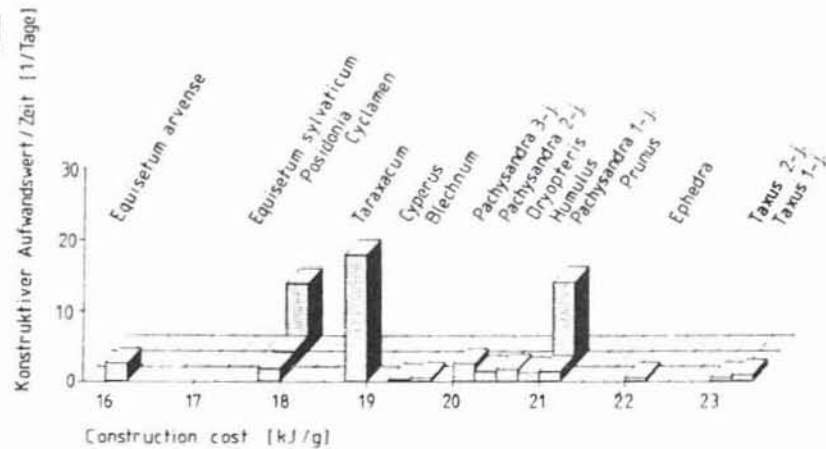
ZUG



DRUCK



ZUG



sehr lange leben und so zu Ästen werden und welche früh absterben. Bezogen auf das ganze System "verzweigter Baum" ist der Aufwand je Zeit um so besser, je mehr Achsen erhalten bleiben. Dem stehen aber andere Faktoren (z. B. gegenseitige Beschattung der Blätter) entgegen. Bei der mehrjährigen Art Pachysandra ist die Lebensdauer der Achsen auf ca. 3-5 Jahre beschränkt. Diese Achsen verholzen nur schwach. Der Aufwand je Zeit ist anfangs konstant und steigt dann an, weil eine große Menge lebendes Gewebe für eine immer kürzere verbleibende Lebenszeit erhalten werden muß. Wenn ausdauernde Konstruktionen für mehr als nur wenige Jahre existieren sollen, ist daher eine Bauweise günstiger, welche die Tragefunktion durch starke Verholzung vorwiegend auf totes Gewebe überträgt. - Die ersten Landpflanzen bezogen noch über 95 % ihrer Biegesteifigkeit aus der Pneustruktur (SPECK u. VOGELLEHNER, 1988).

Bei den kurzlebigen Blüten- und Fruchtstielen ist der Aufwand je Zeit viel höher als bei allen vegetativen Achsen (10- über 20-fach größer als deren optimale Werte). Das Alpenveilchen zeigt dabei die relativ günstigsten Werte. Das System "gekammerter Pneu" im Alpenveilchen-Stengel (der fast keine Verholzung aufweist, vgl. DIERKS u. HAFNER, 1987) ist bei solchen kurzlebigen Organen offenbar vorteilhaft. Die schlechten Werte aller Blüten- und Fruchtstiele resultieren daraus, daß andere konstruktive Notwendigkeiten (z. B. Transportkapazität der Leitungsbahnen) den Kostenaufwand beeinflussen und daß auch noch so kurzlebige Organe nur mit einem Mindestaufwand aufgebaut werden können.

Die Größe konstruktiver Aufwandswert je Zeit liefert ein grobes Maß dafür, wie weit eine bestimmte Konstruktion durch die Selektion optimiert wurde. Je kleiner der Wert ist, um so stärker ist die Selektion in Richtung auf Optimierung der mechanischen Beanspruchung wirksam gewesen. Das Cypergras läßt die hohe konstruktive Qualität des

Gras-Bautyps erkennen, der bei Bambus-Arten vom Menschen schon lange genutzt wird (vgl. IL 31: Bambus). Der Fruchtstiel der Kirsche zeigt demgegenüber bezüglich der mechanischen Stabilität eine schlechte energetische Adaptation, obwohl man für reproduktive Organe eine unmittelbare Selektionswirkung und damit optimalen Bau erwarten darf. Hier müssen andere Funktionen (Stoff- und Wassertransport) gesichert sein und die dadurch gegebenen konstruktiven Randbedingungen (Art und Anordnung der Leitbündel und von deren Sklerenchym) sind wenig veränderlich. Der günstige Zug-Bic-Wert zeigt darüber hinaus, daß eine gute Absicherung besteht (so wie auch der Mensch z. B. eine lebenswichtige Brücke vielfach absichert).

Bei ausdauernden langlebigen Arten sind verholzende Achsen bessere Konstruktionen als nicht verholzende. Beim Bautypus des Baumes mit sekundärem Dickenwachstum muß allerdings der jährliche Massenzuwachs an Holz mit zunehmendem Alter ansteigen. Ein Bautypus ohne sekundäres Dickenwachstum erscheint hier zunächst energetisch vorteilhafter. Er ist z. B. bei Palmen realisiert. In diesem Fall ist aber der Aufbau eines iterierbaren Verzweigungssystems konstruktiv nicht möglich und daher die Lichtnutzung und damit die Energiezufuhr beschränkt. Ein iterierbares Verzweigungssystem ermöglicht nicht nur eine bessere Lichtnutzung, sondern kann auch auf äußere Störungen plastischer reagieren. Dies hängt damit zusammen, daß zwar das Grundmuster der Verzweigung genetisch vorgegeben ist, seine Realisierung aber der Selbstorganisation bedarf. Ein verzweigtes System weist gegenüber dem unverzweigten ein Mehr an Selbstorganisation auf. Dennoch hat die Evolution energetisch vorteilhafte unverzweigte oder wenig verzweigte Systeme vor allem in Gebieten mit hohen Lichtintensitäten immer wieder hervorgebracht, oft im Zusammenhang mit anderen Anpassungen (Carica papaya, Schopfbäume verschiedener systematischer Gruppen, Stammsukkulente verschiedener Familien).

Da die Bic-Werte einen größeren Einfluß auf die konstruktiven Aufwandswerte K haben als die Energieinhalte,

liefern in grober Näherung oft die Bic-Werte allein Anhaltspunkte über das Ausmaß der Optimierung einer Konstruktion im Evolutionsvorgang. Dies gilt vor allem dann, wenn biologisch verwandte Arten mit auch ähnlichen Lebensbedingungen (ökologischen Nischen) untereinander verglichen werden, weil deren Energiegrößen ähnlich sind. Für den Vergleich verholzte/unverholzte Achsen trifft dies nicht zu. Erstere haben höhere Energieinhalte, aber oft auch bessere Bic-Werte, so daß die Konstruktionen bei langer Lebensdauer vorteilhaft werden - auch dann, wenn der konstruktive Aufwand höher als bei unverholzten Achsen liegt.

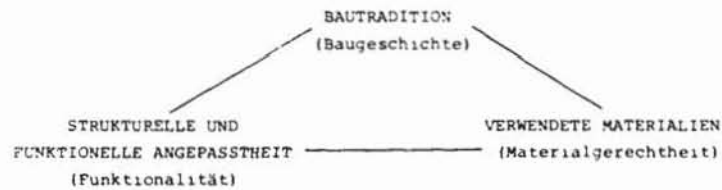
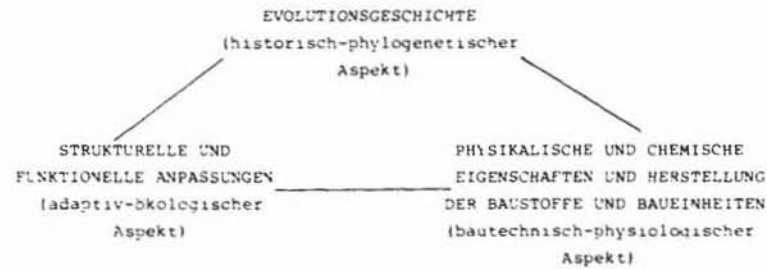
Wenn man die in der Literatur vorliegenden Energiedaten heranzieht (PIPP u. LARCHER, 1988), so ist der Energieinhalt ausdauernder Achsen im Durchschnitt bei Nadelbäumen höher als bei Laubbäumen und hier wiederum höher als bei Einkeimblättrigen (Palmen, Bambus). Vom Energieaufwand her gesehen, sind die letztgenannten somit auch nach dieser Überlegung die günstigsten Konstruktionen.

Die Untersuchung von Konstruktionen der lebenden Natur erfordert nach SEILACHER drei Betrachtungsweisen: die Betrachtung der

- Evolutionsgeschichte (historisch-phylogenetischer Aspekt)
- strukturellen und funktionellen Anpassungen (adaptiv-ökologischer Aspekt)
- physikalischen und chemischen Eigenschaften und der Herstellung der Baustoffe (bautechnisch-physiologischer Aspekt).

Der Bau eines Organs ist stets durch alle drei Faktoren festgelegt; dabei entsteht ein evolutiver Kompromiß. Wir haben gesehen, daß und wie die mechanische Stabilität eine unterschiedliche Rolle spielen kann, in Abhängigkeit von den verschiedenen Funktionen eines Organs.

Nun sind Konstruktionen der lebenden Natur durchaus vergleichbar mit Schöpfungen des Menschen. Die Leistungen des Architekten stehen in einer Bautradition (historischer Aspekt), sind durch die verwendeten Materialien bestimmt



(bautechnischer Aspekt: "materialgerechtes Bauen") und sollten strukturell adaptiv sein sowie Funktionalität aufweisen (adaptiv-ökologischer Aspekt). Auch hier wird die hervorgebrachte Konstruktion allen Aspekten entsprechen müssen. Die Kunst des Schöpfers menschlicher Konstruktionen, die natürlich heißen sollen, ist es, dabei den richtigen Kompromiß zu finden.

Literatur:

DIERKS, K. and L. HAFNER (1987): in Cytomechanics, ed. J. BEREITER-HAHN u. a., S. 242-246

PIPP, E. u. W. LARCHER (1988): Sitz.-ber. Österr. Akad. Wiss., Math.-naturw. Kl., Abt. I (im Druck)

SPECK, T. and D. VOGELLEHNER (1988): Botanica Acta 101, 262-268

WILLIAMS, K., F. PERCIVAL, J. MERINO and H. A. MOONEY (1987): Plant Cell Environm. 10, 725-739