**Zeitschrift:** Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss foresty journal = Journal forestier suisse

**Herausgeber:** Schweizerischer Forstverein

**Band:** 81 (1930)

**Heft:** 3

**Artikel:** Über die mechanischen und physiologischen Wirkungen des Windes auf die Gestalt der Baumstämme

**Autor:** Jaccard, P.

**DOI:** https://doi.org/10.5169/seals-768399

**Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

**Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

**Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

**Download PDF:** 01.07.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch**

# Über die mechanischen und physiologischen Wirkungen des Windes auf die Gestalt der Baumstämme.

Von P. Jaccard.

Sämtliche lebenden Organismen, Pflanzen und Tiere, wie auch die Kristalle, besitzen in ihrer Struktur eine charakteristische Symmetrie. Im allgemeinen zeigt der Stamm der Bäume eine radiäre Symmetrie und eine konzentrische Struktur; die Aeste dagegen haben zweiseitige Symmetrie und exzentrische Struktur. Diese Eigenschaften sind in der Regel um so deutlicher ausgeprägt, je weiter die Wachstumsrichtung dieser Organe von der Vertikalaxe absteht. Da diese Merkmale bei sämtlichen Bäumen in Erscheinung treten, die frei, d. h. ohne irgendwelche äußere Stütze wachsen, und da sie von der Verwandtschaft und systematischen Stellung der betreffenden Pflanzen unabhängig sind, so müssen sie eine durchaus allgemeine Ursache haben. Diese Ursache ist die Wirkung der Schwerkraft, gegenüber welcher sich die Bäume im Gleichgewicht erhalten. Es kann ohne Uebertreibung gesagt werden, daß es in erster Linie die Schwerkraft ist, welche den Symmetrie-Typus des Stammes und der Aeste bedingt. Da die Gravitation als Kraft und Kraftrichtung ununterbrochen wirkt, so orientiert sie das Wachstum des Stengels entsprechend ihrer eigenen Richtung, wodurch eine regelmäßige Verteilung der Jahrringe um die Achse herum bedingt wird. Es ergibt sich daraus eine konzentrische Struktur, welche in statischer Hinsicht die bestmögliche Gleichgewichtsform darstellt. Wie übrigens auch die regelmäßige Verteilung der Aeste um den Stamm herum durch das Licht und durch die Schwerkraft bedingt ist, so sind es diese beiden Faktoren, die zusammen die radiäre Symmetrie des Baumes als Ganzes bewirken.

Anders verhält es sich mit den Aesten. Da die Assimilationstätigkeit der Blätter vom Lichte abhängt, so erreichen sie nur dann ihre beste Lichtlage, wenn die Aeste im allgemeinen um so mehr vom Stamme abstehen, je weiter sie vom Gipfel entfernt sind. So werden sie einer asymmetrischen Einwirkung der Schwerkraft ausgesetzt, und zwar derart, daß ihre obere Seite einem Längszug, ihre untere Seite dagegen einem Druck unterworfen wird; dadurch nehmen sie eine zweiseitige Symmetrie und eine mehr oder weniger ausgesprochene dorsiventrale Struktur an. Nimmt man an, daß keinerlei störende Wirkung sich geltend mache, so ist es wohl der dominierende Einfluß der Schwerkraft und in zweiter Linie derjenige des Lichtes, welche dem Stamm der Bäume mit regelmäßigem Wachstum einen kreisrunden Querschnitt, eine konzentrische Struktur und eine radiäre Symmetrie verleihen; dagegen nehmen ihre Aeste eine um so ausgesprochenere exzentrische Struktur und bilaterale Symmetrie an, je wagrechter sie verlaufen.

Die Schwerkraft ist aber nicht der einzige mechanische Faktor, der

die Form der Bäume zu beeinflussen vermag. Der Wind trägt ebenfalls dazu bei, wie dies die häufigen asymmetrischen Windformen zeigen.

Baumstämmen mit durchaus konzentrischer Struktur begegnet man in der Tat ziemlich selten und nur dann, wenn die Winde, denen sie ausgesetzt sind, aus allen Himmelsrichtungen gleichmäßig einwirken. Stämme, die einem Hauptwinde (Tal- oder Strandwind) unterworfen sind, nehmen eine unregelmäßige Form und eine mehr oder weniger exzentrische Struktur an, nämlich diejenige, die gewöhnlich den Aesten eigen ist. Bei solchen sogenannten Windformen ist also der Einfluß der mechanischen Einwirkung auf die Art der Symmetrie unbestreitbar. Nun stellt sich die Frage: Kann der Wind, der die Deformation und den exzentrischen Bau der Windformen verursacht, gleichzeitig auch die regelmäßige Struktur der konzentrisch wachsenden Bäume bedingen?

Seit den Veröffentlichungen von Knight, Schwendener und besonders Metzger wurde diese Frage häufig von den Forstleuten diskutiert, welche sie vom technischen Standpunkt aus betrachten und eine Schätzungsbasis für die Berechnung der „Schaftform" der Bäume erstreben. Die Physiologen, die sich ebenfalls mit diesen Problemen befassen, suchen vor allem unter den verschiedenen Faktoren, welche das Wachstum beeinflussen, diejenigen zu bestimmen, welche am weitestgehenden die Form und die Struktur bedingen.

In einer kürzlich erschienenen Arbeit „Physiologische Windwirkungen auf Bäume"[1] bespricht Dr. ing. Kurt Fritzsche die verschiedenen bis heute vorgeschlagenen Theorien betreffend die Gestaltung der Baumstämme und gibt im speziellen eine Darstellung der Ergebnisse seiner Experimente und Ausrechnungen über die mechanische Wirkung des Windes auf die Schaftform. Obgleich er durch Experimente den Einfluß des Windes auf die Transpiration festzustellen sucht, kommt er doch zu dem Schlusse, daß die mechanische Wirkung dieses Faktors auf die Baumstämme im Sinne der Metzgerschen Auffassung maßgebend ist.

* * *

In seiner klassischen Arbeit „Der Wind als maßgebender Faktor für das Wachstum der Bäume" kommt A. Metzger bekanntlich zu dem Schlusse, daß der Schaft der Bäume einem Körper von gleichem Widerstand gegenüber der Windkraft entspricht, eine Meinung, die von der Mehrzahl der Forstleute angenommen wurde. Nach diesem Forscher zeigt der Koniferenstamm und speziell derjenige der vollholzigen Rottannen unterhalb des Kronenansatzes die Form eines Paraboloids von gleichem Widerstand, welches dadurch charakterisiert ist, daß die Kuben der Durch-

[1] Dr. K. Fritzsche. Promotionsarbeit aus dem botan. Institut der forstl. Akademie in Tharandt (Prof. Münch). Verlag von J. Neumann, Neudamm 1929.

messer in verschiedener Höhe, graphisch dargestellt, auf einer Geraden liegen, deren Verlängerung die Vertikalachse im Schwerpunkt der Krone als Angriffsfläche des Windes schneidet. Ohne indessen irgendwie in Abrede zu stellen, daß öfters der Schaft der Bäume tatsächlich in gewissen Höhen wenigstens annähernd eine Form annimmt, die derjenigen eines Trägers von gleichem Widerstand entspricht, habe ich mich gefragt, ob dies vor allem der mechanischen Wirkung des Windes zugeschrieben werden könne. Gestützt auf eigene Berechnungen nach den Messungen der forstlichen Zentralanstalt in Zürich, die sich auf zahlreiche Koniferen, Fichte, Tanne und Kiefer, wie auch einige große Exemplare von Eichen und Buchen beziehen, konnte ich von der durch Metzger ausgerechneten Form gewisse konstant vorkommende Abweichungen feststellen, welche durch die mechanische Wirkung des Windes nicht erklärt werden können. Bei Ermittlung der Leitfähigkeit der wasserleitenden Elemente in den letzten Jahrringen des Stammes kam ich aber zu der Ueberzeugung, daß außer dem Winde, dessen Wirkung eine unregelmäßige ist, ein in höherem Maße konstanter physiologischer Faktor für die geometrische Form der Baumstämme mit regelmäßigem Wachstum bestimmend sei: nämlich die Anforderungen der Wasser- und Stoffleitung.[1]

In Anlehnung an die Bezeichnung Metzgers betrachtete ich diese Form als diejenige eines Schaftes von gleicher Wasserleitungskapazität. Suchen wir diese Auffassung theoretisch zu begründen. Vor allem muß zwar der Baumstamm den statischen Anforderungen und den Windwirkungen gewachsen sein, die sein Gleichgewicht bedrohen; er muß aber auch seinen physiologischen Wachstumsbedingungen entsprechen. Seine Hauptaufgabe besteht ja darin, den symmetrisch um den Stamm herum verteilten Aesten das Wasser und die mineralischen Nährstoffe herbeizuschaffen und regelmäßig zu verteilen. Zufolge des Längenwachstums besteht der Baumstamm aus einer nach oben hin abnehmenden Zahl von konzentrischen Ringen, was mit einer zunehmenden Verminderung des Stammquerschnittes parallel geht. Diese Verminderung wird aber durch die Dickenzunahme der Ringe, die von der Basis des Stammes aufwärts zustande kommt, bis zu einem gewissen Grade kompensiert. Dank dieser fortschreitenden Ausbreitung der Jahrringe erlangt der vollholzige Stamm in der Tat die Form eines Paraboloids und nicht diejenige eines Kegels, wie dies der Fall wäre, wenn

---

[1] P. Jaccard. Eine neue Auffassung über das Dickenwachstum der Bäume. Naturw. Zeitschr. für Forst- und Landwirtschaft. Stuttgart 1913 und 1915, und « Nouvelles recherches sur l'accroissement en épaisseur des arbres. Essai d'une théorie physiologique de leur croissance concentrique et excentrique » (Gekrönte Preisschrift der Stiftung Schnyder von Wartensee. Zürich) 1919.

er sich alljährlich in jeder beliebigen Höhe gleichmäßig verdicken würde. Freilich wird durch diese Verbreiterung der Jahrringe nach dem Gipfel hin der Widerstand gegenüber der biegenden Kraft des Windes erhöht; doch ist sie von nicht geringerer Bedeutung in physiologischer Hinsicht. Das Aufsteigen des Wassers im Holz, welches vor allem durch physikalische Kräfte bedingt wird, unterliegt den Gesetzen der molekulären Dynamik, insbesondere dem des Transportes auf kürzestem Wege oder auf dem Wege des geringsten Widerstandes. Aehnlich verhält es sich mit der Zirkulation der in den Blättern gebildeten Assimilate in der inneren Rinde. Nun ist aber der kürzeste Weg für den Transpirationsstrom zu den verschiedenen Teilen der Krone gleich dem entsprechenden geradlinigen Abschnitt des Schaftes, wobei es sich besonders um die der Peripherie am nächsten liegenden, d. h. letztgebildeten Leitungselemente handelt. Taucht man nämlich von verschiedenen Kapillarröhrchen die einen vertikal, die andern mehr oder weniger geneigt und wieder andere mit S-förmiger Krümmung ins Wasser, so konstatiert man, daß in einer gegebenen Zeit das höchste Niveau in den gerade und vertikal gestellten Röhrchen erreicht wird, während in den geneigten oder gekrümmten Kapillaren das Wasser auf dem gleichen Niveau erst in einer um so längeren Zeit anlangt, als der zu durchlaufende Weg größer ist.

Es folgt daraus, daß der Leitungsquerschnitt eines gleichmäßig belichteten Baumes mit regelmäßig entwickelter Krone notwendigerweise kreisrund sein muß, entsprechend der regelmäßigen Struktur der aufeinanderfolgenden Ringe.

Da aber der Wassertransport im Schaft von unten nach oben tatsächlich nur dann auf dem kürzesten Wege erfolgen kann, wenn auf jedem Niveau die Leitungskapazität konstant bleibt,[1] so ist ein Zuwachs der kreisförmigen Fläche im Frühholze des Schaftes in dem Maße notwendig, als sein Durchmesser sich vermindert. Wenn infolge einer Verkleinerung des Durchmessers der Tracheiden oder der Gefäße, wie man es oft in den oberen Teilen des Stammes z. B. beobachtet, die Reibungswiderstände auf einer bestimmten Höhe anwachsen, so muß die Zahl der Leitungselemente und damit die Breite des Frühholzes entsprechend größer werden, um eine gleichmäßige Leitungskapazität pro Flächeneinheit zu ermöglichen.

Das gleiche kann durch den gewundenen Verlauf der Tracheiden hervorgebracht werden, wodurch eine Verlängerung des vom Wasser zu durchlaufenden Weges zustande kommt. Gewisse Forscher haben mir vorgeworfen, daß es schwierig sei, den Anteil jedes Jahrringes an dem

[1] Dabei handelt es sich natürlich um eine bestimmte Intensität der Transpiration, was zwar nicht bedeuten soll, daß pro Flächeneinheit stets die gleiche Wassermenge befördert werde.

Wassertransport zu berechnen und den Leitungsquerschnitt für verschiedene Stammhöhen genau zu bestimmen. Man kann allerdings nicht behaupten, daß die Wasserzirkulation ausschließlich im letzten Ringe vor sich gehe und ebensowenig, daß auf jedem Niveau die transportierte Wassermenge der betreffenden Ringfläche genau proportionell sei. Verschiedene Ursachen, wie eine Ablenkung im Verlauf der leitenden Elemente zufolge von Knoten, die ungleiche Breite der Tracheiden oder der Gefäße auf verschiedenen Höhen, sodann auch ungleiche Belichtung und Erwärmung der Krone, rufen gewiß in der Leitfähigkeit des Holzes entsprechende Veränderungen hervor. Es unterliegt jedoch keinem Zweifel, daß das leitende Gewebe des letzten Jahrringes im Aufstieg des Wassers die weitaus größte Rolle spielt und so sind wir berechtigt, dasselbe als Basis für eine Berechnung der Leitungskapazität des Schaftes anzunehmen. Die älteren benachbarten Ringe funktionieren eher als Ersatz und helfen nötigenfalls mit, die Leitfähigkeit auf jedem Niveau mehr oder weniger konstant zu erhalten. Dies wird besonders der Fall sein, wenn die Transpiration der grünen Organe vorübergehend die Wassermenge übersteigt, welche die Wurzeln gleichzeitig aufzunehmen vermögen. In diesem Falle geht das Reservewasser aus dem Splint nach und nach auf dem direktesten Wege bis zu den jüngsten oder zum mindesten zu denjenigen Leitungselementen, die am ehesten geeignet sind, einen raschen Aufstieg zuzusichern. Die Bedeutung des wasserhaltigen Holzkörpers als Regulierungsorgan bei der Transpiration wurde durch die Messungen von Friedrich[1] klargelegt, aus denen hervorgeht, daß der Stammdurchmesser der großen Bäume tägliche Schwankungen aufweist. Während des Tages nimmt infolge des durch die Transpiration verursachten Wasserverlustes die Dicke des Stammes ab, steigt dagegen dank einer Wiederaufspeicherung des Wassers im Holzgewebe während der Nacht zeitweilig an.

Die Ausbildung des Stammes der Bäume mit regelmäßigem konzentrischen Wachstum, wie es aus dem Dickenwachstum hervorgeht, entspricht schließlich dem gleichzeitigen Einfluß von drei hauptsächlichen Faktoren: der Schwerkraft, dem Lichte und dem Wind: statische, dynamische und photochemische Wirkung. Da die Zahl der leitenden Elemente und die Leitungskapazität derselben der Größe des Wasserkonsums und den Anforderungen der Wasserzirkulation entsprechen, so kann der formbildende Einfluß dieses Faktors nicht geleugnet werden. Während die Leitungsgewebe sozusagen nie fehlen — denn selbst in Fällen außerordentlich langsamen Wachstums mit Ringen von nur 2—5 Tracheidenlagen werden beinahe nur leitende Elemente gebildet — entwickelt sich das mechanische Gewebe allgemein nur dann, wenn die Leitungselemente

[1] Mitteilungen a. d. forstl. Versuchsw. Oesterr. 22. H. Wien 1897.

in genügender Zahl vorhanden sind, um bis zum Ende der Vegetationsperiode den notwendigen Wassertransport zuzusichern.[1]

## Physiologische Wirkung des Windes.

Im allgemeinen wird durch den Wind die Wasserabgabe und infolgedessen die Wasserzirkulation beschleunigt; dadurch wird indirekt der Gang des Dickenwachstums beeinflußt. Wie Fritzsche dies durch eigene Experimente bestätigt, ist diese Wirkung bei den Laubhölzern bedeutend stärker als bei den Nadelhölzern, was übrigens leicht erklärlich ist, wenn man bedenkt, daß im allgemeinen der Wasserverbrauch und die Leitungskapazität des Holzes bei den ersteren stärker ist als bei den letzteren.[1] Es sind aber in erster Linie die schwachen Winde, d. h. diejenigen von geringer mechanischer Wirkung, welche die Transpiration erhöhen. Durch starke Winde wird das Wachstum eher beeinträchtigt, wie dies deutlich aus dem Verhalten der Bäume am Waldrande eines Bestandes ersichtlich ist.

Bezüglich der Wirkung des Windes auf die Transpiration kommt Fritzsche zu folgenden Schlußfolgerungen:

Im allgemeinen zeigt sich im Winde eine Zunahme der Transpiration sowohl bei Laub- als auch bei Nadelhölzern.

Es besteht jedoch ein wesentlicher Unterschied bezüglich der Höhe der Transpirationszunahme zwischen Laubhölzern einerseits und Fichte und Tanne anderseits, während Douglasie etwa eine Mittelstellung einnimmt.

Bei den Laubhölzern wurde als Höchstwert eine Steigerung auf etwa das Dreieinhalbfache beobachtet, bei der Fichte nur eine solche um ein Drittel.

In einigen Fällen wurde jedoch auch eine Abnahme der Transpiration im Winde beobachtet oder ein Gleichbleiben, und zwar bei Fichte und Spitzahorn. Bei letzterem wurden in diesem Falle die Stomata stark verengt bis geschlossen.

Verengung der Stomata wurde außerdem beobachtet bei Buche und Douglasie.

Dagegen blieben die Stomata bei Birke, Hasel und Esche auch bei stärkstem Winde unverändert. Das hatte hohe Transpirationsverluste zur

---

[1] H. Burger hat neulich ausgerechnet, daß unter ähnlichen Wachstumsbedingungen der Wasserkonsum der Laub- und Nadelhölzer, wie Buche, Eiche, Kiefer und Fichte, verschieden ist, sofern man nicht das Volumen, sondern die Menge (absolutes Trockengewicht) der organischen Substanzen in Betracht zieht. Da auf gleiches Volumen oder auf Blattfläche bzw. Blattgewicht bezogen die Laubhölzer im allgemeinen besonders während der Bildung des Frühholzes doch entschieden mehr Wasser konsumieren als die Nadelhölzer, so wird dadurch an unserem Standpunkt betreffs der formbildenden Wirkung der Wasserzirkulation nichts geändert.

Folge, was in einigen Fällen bei Birke und Hasel zum Abwelken der Pflanzen führte.

Bei den Laubhölzern sind die Steigerungen im Winde zum Teil auf die starken Biegungen zurückzuführen, wie Versuche mit fixierten Pflanzen zeigten.

Dagegen war bei Fichte Fixierung ohne Einfluß, was dadurch zu erklären ist, daß die Organe der Fichte, insbesondere ihre Nadeln, an sich schon sehr starr und biegungsfest sind. Die große Starrheit ist eine der Ursachen, weshalb die Transpiration bei Fichte (und Tanne) im Wind so wenig oder gar nicht gesteigert wird.

Nach dem Maße der Transpirationssteigerung im Winde ergibt sich die Reihenfolge: Hasel, Birke, Esche, Spitzahorn, Douglasie, Fichte (Tanne).

Die Reihenfolge der Laubhölzer entspricht der von von Höhnel aufgestellten über den Gesamtwasserverbrauch während einer Vegetationsperiode (bezogen auf 100 g Blatttrockensubstanz), so daß also offenbar eine Parallelität besteht zwischen absolutem Wasserverbrauch und Transpirationssteigerung im Winde. Dies spricht zugunsten unserer Auffassung, nach welcher der Wind eher auf indirekte Weise als formbildender Faktor wirkt, und zwar durch seinen beschleunigenden Einfluß auf die Transpiration und damit auf die Geschwindigkeit und Größe der Wasserzirkulation.

## Biegungsbeanspruchung durch den Wind.

Bei windstillem Wetter wird der Stamm eines großen Baumes zufolge seines eigenen Gewichtes einer relativ schwachen Druckbeanspruchung in vertikaler Richtung ausgesetzt. Sie beträgt meistens 10—50 kg pro cm² Querschnittfläche, einen Wert, der beträchtlich geringer ist als die eigentliche Druckfestigkeit des Holzes. Bei starkem Winde sind die Verhältnisse ganz anders. Es machen sich am Stamm Druck- und Zugspannungen geltend, die nach meinen Berechnungen wohl 200—400 kg pro cm² erreichen. Bei schwachem oder mittelstarkem Wind, der in keiner Weise die Pflanze bedroht, beträgt die Biegungsarbeit des Stammes dagegen meist weniger als 100 kg pro cm². Kann man nun den sehr starken Winden, die eher selten und regellos auftreten und welche in der Tat das Wachstum beeinträchtigen, eine regelmäßige und direkte formbildende Wirkung auf den Stamm der Bäume zuschreiben?

Nach Metzger wäre allerdings die Schaftform und die Biegungsfestigkeit der Baumstämme eher als eine durch natürliche Selektion erblich erworbene Eigenschaft aufzufassen. Ich habe schon anderswo gezeigt, wie dieser darwinistische Standpunkt Widersprüche in sich birgt, indem seine Anhänger sich gleichzeitig auf finalistische Momente und aktuell wirkende Faktoren stützen. Ich leugne gewiß nicht den Einfluß des Windes auf das Dickenwachstum. Durch meine experimentellen Biegungsver-

suche mit jungen Bäumen habe ich denselben klargelegt. Ich habe aber versucht, festzustellen, daß es nicht zulässig ist, die regelmäßige konzentrische Struktur und die Schaftform der Bäume dem maßgebenden Einfluß eines so unregelmäßig wirkenden Faktors zuzuschreiben. Selbst in den von Fritzsche untersuchten Fällen ist die Uebereinstimmung zwischen der wirklichen Form und derjenigen eines Trägers von gleichem Widerstand bei weitem nicht befriedigend. Ich greife nur das Beispiel der „Fichte 33" heraus: Fichte von 20 m Höhe mit 5 m Kronenlänge, Kronenansatz ungefähr 15 m über dem Boden. Es werden hier nur die Abweichungen der wirklichen Durchmesser gegenüber den theoretisch berechneten erwähnt, die in bezug auf den Biegungswiderstand nicht außer acht gelassen werden können. Zwischen $5_{,5}$ und $6_{,8}$ m z. B. ist der Unterschied $1_{,1}$ cm, zwischen $7_{,75}$ und 9 m, $0_{,9}$ cm. Suchen wir, nach der Berechnungsmethode, die ich in meiner ersten Abhandlung dargestellt habe, die Biegungsbeanspruchungen zu ermitteln, welche bei dem oben erwähnten Fichtenstamm durch die Windkraft entstehen. Nehmen wir an, daß auf die 5 m hohe Krone des betreffenden Baumes eine Windkraft von 300 kg einwirke und am Stamme in 2 m Höhe über dem Kronenansatz (mit S bezeichnet), d. h. 17 m über dem Boden, ihren Angriffspunkt habe. Mittels der Formel $\beta = \frac{M}{W}$, wobei $\beta$ = Biegungsbeanspruchung, l = Hebelarm, das heißt Distanz vom Punkte S zu der in Betracht gezogenen Höhe. M = Biegungsmoment = Wk mal l (auf 300 kg bezogen). Wk = Windkraft. W = Widerstandsmoment, wie es den Durchmessern der Querschnitte entspricht, erhält man für die Biegungsarbeit $\beta$ folgende Zahlen:

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| bei | $5_{,50}$ m | ungefähr | 230 | kg | pro | cm² |
| „ | $6_{,80}$ „ | „ | 197 | „ | „ | „ |
| „ | $7_{,75}$ „ | „ | 195 | „ | „ | „ |
| „ | 9 „ | „ | 211 | „ | „ | „ |
| „ | $1_{,65}$ „ | (Brusthöhe) | 223 | kg | pro | cm² |
| „ | $14_{,35}$ „ | (oberer Schaftteil) | 139 | kg | pro | cm² |

Wie aus diesen Zahlen hervorgeht, ändert sich die Biegungsarbeit, welcher der fragliche Fichtenstamm unterworfen ist, vorausgesetzt, daß das spezifische Gewicht und die Festigkeit des Holzes gleichbleiben, manchmal beträchtlich von Niveau zu Niveau. Die Differenz beträgt z. B. 33 kg pro cm² bei einem Abstand von $1_{,30}$ m (zwischen $5_{,5}$ m und 6—8 m) und mehr als 84 kg pro cm² zwischen Basis und Kronenansatz. Wir haben es daher eigentlich nicht mit einem Träger von gleichem Widerstand zu tun.

Es wird mir vielleicht entgegnet, daß diese Abweichungen nicht besser passen auf einen Schaft von gleicher Leitungsfähigkeit. Dieser Einwurf könnte berechtigt sein, wenn die Wasserleitungselemente in allen Teilen des Stammes von unten bis oben in Durchmesser, Länge und Richtung untereinander genau gleich wären. Dies ist aber, wie schon

gesagt, selten der Fall. Die Unterschiede, die für die Leitungskapazität pro Flächeneinheit daraus resultieren, werden dann meistens durch eine entsprechende Entwicklung des leitenden Gewebes kompensiert, was besonders in der Nähe von Astansätzen oder sogar von Knoten, die unter der Rinde verborgen sind, zustande kommt. So entstehen mehr oder weniger ausgeprägte Abweichungen gegenüber dem berechneten Durchmesser in verschiedenen Teilen eines Schaftes von gerader Struktur.

Wie aus meinen früheren Publikationen hervorgeht, kommt eine solche Erweiterung des Durchmessers regelmäßig sowohl in den oberen wie in den unteren Teilen des astfreien Stammes vor. In unseren Berechnungen der Biegungsbeanspruchungen kommt diese sozusagen übermäßige Erweiterung zum Ausdruck in den Werten der Biegungsarbeit, die regelmäßig geringer sind als diejenigen des geraden Schaftteiles.

Nehmen wir als Beispiel die von Fritzsche gemessene Fichte Nr. 31 (loc. cit. S. 105; — Fichte von 21 m Höhe, mit 8 m langer Krone und einem Stammdurchmesser von $27,_3$ cm bei $1,_{45}$ m). Die Biegungsbeanspruchungen auf verschiedenen Höhen bei Annahme einer Biegungskraft des Windes auf den Stamm von 300 kg bei $16,_{25}$ m über Boden als Angriffsstelle, sind folgende: 223 kg pro cm² bei $1,_{85}$ m, 231 kg bei $2,_{55}$ m, 234 kg bei $2,_{90}$ m, 243 kg bei $4,_{93}$ m, 186 kg bei $8,_5$ m und 199 kg bei $13,_{05}$ m, d. h. an der Kronenbasis. Oberhalb und unterhalb von 5 m sind also die Durchmesser verhältnismäßig vergrößert, so daß dort der Stamm einen entsprechend höheren Biegungswiderstand zeigt als in dem geradlinigen mittleren Teile. Wir sehen die Ursache der erwähnten Vergrößerungen des Durchmessers in einer Verlängerung der Wasserbahnen zufolge einer Ablenkung bzw. eines gewundenen Verlaufes der Tracheiden und Gefäße im Vergleich zum geradlinigen Verlaufe der Leitungselemente im mittleren, astlosen Schaftteil.

Im oberen Teil des Schaftes ist die Ablenkung durch die Basis resp. durch die Ueberreste der dem Stamm noch anhaftenden dürren Aeste verursacht. Der von ihnen eingenommene Raum vermindert die nutzbare Leitungsfläche jedes Ringes, was einen Kompensationszuwachs und dadurch eine Vergrößerung der Ringfläche auf dem betreffenden Niveau hervorruft. Ich habe gezeigt, daß die in bezug auf die Anforderungen der Biegungsfestigkeit relativ übermäßige Vergrößerung der Durchmesser im oberen Teil des Schaftes und im Verhältnis zum astlosen Teil sich gerade vom Niveau der untersten dürren Aeste an geltend macht. Im unteren Teil des Stammes rührt dagegen diese Abweichung wenigstens teilweise von der mehr oder weniger schiefen oder horizontalen Lage der Hauptwurzeln her, deren Einfluß sich bis zu einer gewissen Höhe über dem Boden fühlbar macht, d. h. einem Niveau, auf dem der Stamm seinen relativen Minimaldurchmesser besitzt. Fügen wir noch hinzu, daß die mehr oder weniger aus-

geprägte Krümmung an der Uebergangsstelle vom Stamm zu den Wurzeln, durch die das Aufsteigen des Wassers und die Zuleitung der Assimilate zu den unterirdischen Organen verlangsamt wird, in doppelter Weise zu der charakteristischen Erweiterung des Wurzelhalses beiträgt. Anderseits führt diese Krümmung im Laufe des Dickenwachstums zu einem Längsdruck, welcher allgemein in der Struktur des Holzes auf diesem Niveau eine Ueberschiebung und Ablenkung, ja sogar bei den Fichten im speziellen, eine Verschlingung und eine Verkürzung der Tracheiden und dadurch eine Vergrößerung des der Wasserzirkulation entgegenwirkenden Reibungswiderstandes verursacht. In ihrem Längenwachstum durch diesen Längsdruck gehemmt, anderseits durch die Zufuhr der Nährflüssigkeit begünstigt, deren Strom gegen die Wurzeln hin durch die Krümmung[1] an der Basis des Stammes verlangsamt wird, wächst das Holzgewebe entsprechend in die Breite, während pro Flächeneinheit seine Wasserleitungskapazität proportionell abnimmt.

Meine Berechnungen, die auf die Leitfähigkeit des Frühholzes gestützt sind und bei denen diese letztere für die geraden astlosen Teile einer hochstämmigen Fichte als konstant angenommen wurden, zeigen klar, daß es wohl möglich ist, eine theoretische Schaftform auszurechnen, die den wirklichen Formen nähersteht, als diejenige eines Trägers von gleichem Widerstand. Das will nun freilich nicht heißen, daß die wirklichen Formen nicht ebenfalls in dem einen oder anderen Punkte von der fraglichen idealen Form abweichen; jedoch, während die z. B. bei einer Fichte beobachteten Abweichungen von einem Niveau zum anderen mit der mechanischen Theorie unvereinbar sind, da sie Stellen von geringerem Biegungswiderstand schaffen, welche bei Stürmen gerade die anscheinend regellos vorkommenden Stammbrüche in beliebiger Höhe über Boden erklären, so lassen sich diese Abweichungen[2] durch die Wasserleitungstheorie ganz natürlich erklären.

In der Berechnung der Biegungsbeanspruchung treten freilich zwei Elemente der Unsicherheit auf: 1. Die Schwierigkeit, in jedem Falle den

---

[1] Diese Verlangsamung ist analog derjenigen, welche die Baumzüchter beobachten, wenn sie die Aeste, die sie zur Fruchtbildung bringen wollen, krümmen und dadurch im Saftstrom eine Stockung oder eine Hemmung bewirken. Daraus erklärt sich auch die Erhöhung des spezifischen Gewichtes beim Holz des Wurzelhalses.

[2] Man hat bis zur Stunde nicht feststellen können, ob die Variationen, die auf verschiedenen Höhen eines Stammes auftreten, in bezug auf das relative Verhältnis zwischen Leitungs- und mechanischem Gewebe, und das daraus resultierende verschiedene spezifische Gewicht, durch die Schwankungen des Durchmessers genau kompensiert werden, um das Moment der Biegungsbeanspruchung auf jedem Niveau konstant zu erhalten, wie es die Anhänger der mechanischen Theorie angeben. Es scheint dies jedenfalls durch zahlreiche Tatsachen widerlegt.

Angriffspunkt S der Biegungskraft zu ermitteln. Meistens stimmt er, wie dies nach der mechanischen Theorie sein sollte, mit dem geometrischen Mittelpunkt der Krone nicht überein. Da die sehr biegsamen oberen Teile sich in viel weitgehenderem Maße dem Winddruck entziehen, als die großen Aeste, so muß der Punkt S tatsächlich dem Kronenansatz näher liegen. Dadurch befindet er sich meistens nicht auf der Verlängerung der Geraden, welche bei graphischer Darstellung die Kuben der Durchmesser untereinander verbindet. 2. Die Veränderungen im spezifischen Gewicht des Holzes, die besonders davon herrühren, daß auf verschiedenen Stammhöhen das Verhältnis der jungen Ringe zu den älteren, d. h. das Verhältnis des dichteren Herbstholzes zum leichteren Frühlingsholz variiert. Erwähnen wir ferner, daß Länge und Weite der Tracheiden und Gefäße zwischen der Basis und dem oberen Teil des Schaftes öfters starke Differenzen aufweisen. So ergibt sich das Dilemma: Entweder ist der Stamm ein Träger von gleichem Widerstand, dann muß seine geometrische Form den Abweichungen des spezifischen Gewichtes und der Biegungsfestigkeit des Holzes auf verschiedenem Niveau entsprechen, oder dann ist seine Form die eines Paraboloids, die den mechanischen Theorien entspricht, wobei aber sein Biegungswiderstand in verschiedenen Höhen nicht gleich ist.

Bezüglich der Lage des Kronenschwerpunktes bemerkt Fritzsche (loc. cit. S. 83):

Die Lage des Kronenschwerpunktes weicht von dem graphisch ermittelten z. T. erheblich ab ... sie befindet sich häufig höher als der wirkliche Flächen- bzw. Volumenschwerpunkt. Das will heißen, daß bei graphischer Darstellung die Verlängerung der Verbindungslinie der Kuben der Durchmesser ($D^3$) die Kronenaxe höher schneidet, als die Theorie es verlangt; mit andern Worten befindet sich in der Tat, wie ich es soeben betont habe, der Angriffspunkt (S) der Windkraft tiefer als der oben erwähnte Schneidepunkt von $D^3$ mit dem Stengel.

Was die Abhängigkeit der Schaftform gegenüber dem Wind bei den Laubbäumen anbelangt, so kommt Fritzsche zu dem Schluß, daß unter den von ihm untersuchten Eichen und Buchen nur der Eichenstamm die Form eines Trägers von gleichem Widerstand bietet, allerdings mit größeren Abweichungen als bei den Nadelhölzern. Die Lage des Kronenschwerpunktes war auch bei der Eiche z. T. anders als bei den Nadelhölzern. Bei der Buche war der Verlauf der Stammkurven so unregelmäßig, daß eine Annäherung an die kubische Parabel nicht zu erkennen war. Bei 31 untersuchten Fichten und Kiefern zeigten dagegen nach den Ausrechnungen von Fritzsche 30 die Form von Trägern gleichen Widerstandes gegen Biegung (allerdings mit den oben angegebenen Abweichungen).

Ferner sieht Fritzsche auch einen Beweis zugunsten der Metzgerschen Auffassung in der Tatsache, daß der Schlankheitsgrad der Stamm-

form (loc. cit. S. 84) mit zunehmender Entfernung vom Bestandesrande variiert. Dafür können aber die Lichtverhältnisse, sowie die geringere Transpiration in windgeschützter Lage ebensogut wie die Abnahme der mechanischen Wirkungen verantwortlich gemacht werden.

## Exzentrisches Wachstum des Stammes.

Bekanntlich ist der Stamm der den Strand- oder Talwinden ausgesetzten Bäume exzentrisch gebaut und der größere Radius des Querschnittes liegt allgemein in der Windrichtung.[1]

In diesem Falle ist die Wirkung des Windes unbestreitbar; doch ist sie sekundär. Primär sind für die Exzentrizität hauptsächlich die Schwerkraft und die kontinuierlichen Zug- und Druckwirkungen verantwortlich, die eintreten, sobald der Stamm dank der Windkraft von der Vertikalrichtung mehr oder weniger absteht. Man kann in der Tat bei exzentrischen Stämmen zufolge ihrer schiefen Stellung eine ähnliche Reaktion beobachten wie diejenige, die sich bei den andauernd durch die Schwerkraft gebogenen Aesten einstellt. Wie diese, haben in der Regel die geneigten Stämme der Nadelhölzer ihre größte Breite auf der Druckseite, während sich bei den Laubhölzern im Gegenteil der größere Radius auf der Zugseite zeigt.

Die an den steilen Berghängen wachsenden Bäume verhalten sich gleich, wenn auch ihre Aeste auf der stärker belichteten Talseite ausgiebiger entwickelt sind. Die Windkraft kann in der Tat auf den Stamm der Bäume nur dann eine unbestreitbare morphogenetische Wirkung ausüben, wenn sie kontinuierlich nach einer bestimmten Richtung sich geltend macht, und zwar deshalb, weil so auf den gegenüberliegenden Seiten ununterbrochene Druck- und Zugwirkungen in der Windrichtung der geneigten Stämme entstehen.

Der Wind vermag als solcher die Assimilation nicht zu verstärken. Wenn er z. B. auf der Druckseite das Dickenwachstum begünstigt, so wird die Verdickung auf der gegenüberliegenden Seite entsprechend reduziert sein.

Zusammenfassend können wir die Schaftform wie auch die konzentrische Struktur und die radiäre Symmetrie der regelmäßig wachsenden Baumstämme hauptsächlich folgenden Faktoren zuschreiben:

1. Der als orientierenden Kraft wirkenden Schwere.
2. Den Anforderungen des Wassertransportes auf dem Wege des geringsten Widerstandes und des schnellsten Aufsteigens.

---

[1] Ich habe zwar durch eigene Experimente gezeigt, daß die über ein gewisses Maximum gesteigerte Biegungskraft eine zur Windrichtung senkrecht orientierte Verbreiterung des Durchmessers herbeiführt, während sie bei schwächerer Biegungskraft dieser Richtung parallel ist. (Nouvelles recherches. loc. cit. S. 118. Taf. XVII.)

3. Der mechanischen Wirkung der Schwerkraft und des Windes bei den geneigten Stämmen und Aesten, und ganz besonders bei den Windformen, bei denen sie eine exzentrische Struktur und eine bilaterale Symmetrie hervorbringt. Was die schwächeren Winde anbetrifft, so wirken diese gleichzeitig physiologisch und mechanisch; indem sie die Transpiration erhöhen, beschleunigen sie die Wasserzirkulation und damit ihre morphogenetische Wirkung. Anderseits können bei den hin und her gebogenen Stämmen gewiß auch die Zellteilungen im Cambium befördert werden; da aber die mechanische Windkraft in der Hauptsache unregelmäßig und von einer Gegend zur anderen veränderlich ist, so kann nur schwer angenommen werden, daß sie trotzdem überall eine gleichmäßige Reaktion verursache. Es folgt daraus, daß die durch verschiedene Forstleute — unter anderen neuerdings durch Tor Jonson — für die Berechnung der Schaftform vorgeschlagenen Formeln keine allgemeine Gültigkeit besitzen. Da sie von Messungen abgeleitet werden, die sich auf Baumstämme beziehen, welche unter bestimmten Bedingungen gewachsen sind und demgemäß lokalen Einflüssen, insbesondere der Herrschaft der Winde, die in der betreffenden Gegend einwirken, so können solche Formeln nicht von gleichem Werte sein für Gebiete mit anderen klimatischen und meteorologischen Bedingungen.

---

# Zur Bildung der Durchmesserstufen bei Einrichtungsarbeiten.

Von H. Knuchel, Zürich.

Mit der Einführung der Kontrollmethoden in die Praxis tauchen fortwährend neue einrichtungstechnische Fragen auf, deren Lösung in der Regel nur durch einen Kompromiß zwischen theoretischen und praktischen Rücksichten gefunden werden kann. Eine solche Lösung hat man beispielsweise mit der Einführung der sogenannten Einrichtungstarife gefunden, die nichts anderes sind, als Massentafeln, die man den Bedürfnissen der Forsteinrichtung angepaßt hat. Bei ihrer Anwendung setzt man sich über die Tatsache hinweg, daß Bäume verschiedener Höhe auch verschiedene Massen haben.

Aber mit der Anpassung theoretisch einwandfreier Rechnungsmethoden an die Bedürfnisse der Praxis ist nicht unbedingt eine Verminderung der Genauigkeit der Rechnung verbunden, indem unter Umständen mit kleinen Nachteilen sehr viel größere Vorteile in Kauf genommen werden können. So gestattet die Anwendung eines Tarifes, den Zuwachs der Bestände mit größerer Genauigkeit zu bestimmen, als dies praktisch, bei Anwendung genauer Massentafeln, der Fall wäre.

Eine andere, wie mir scheint sehr wichtige Frage, von der man bisher annahm, daß sie längst und definitiv geregelt sei, die sich aber tatsächlich bei der Einführung der Kontrollmethoden neu stellt, ist die Frage