

Thomas Sinn

Handbuch Baumstatik

Schadsymptome und Messverfahren zur
Feststellung der Stand- und Bruchsicherheit



QUELLE & MEYER

Thomas Sinn

Handbuch Baumstatik

Schadsymptome und Messverfahren zur Feststellung
der Stand- und Bruchsicherheit



Quelle & Meyer Verlag Wiebelsheim

Inhaltsverzeichnis

Vorwort und Danksagung	7
1 Die „natürliche Konstruktion Baum“	9
1.1 Baumstatik und Phylogenese	11
1.1.1 Sukzession von Waldgesellschaften	18
1.2. Baumstatik und Wund- sowie Reaktionsholzbildung	21
1.3 Das Baumfundament – der Wurzel-Erde-Verbund	25
1.3.1 Zum Einfluss des Bodens auf die Standsicherheit und Wurzel Ausbildung von Bäumen	28
1.3.2 Wassergehalt, Bodenluft, Nährstoffe und andere Einflüsse	36
1.3.3 Wurzelsysteme	54
1.3.4 Spezielle Wurzelformen	63
1.3.5 Wurzelreichweiten	74
1.3.6 Schäden an Bauwerken durch Wurzelwachstum	87
1.3.7 Der statisch wirksame Wurzelraum	99
1.4 Das oberirdische Tragwerk	107
1.4.1 Funktion und Anatomie des Holzgewebes	108
1.4.2 Wuchsform und Kronenstruktur	121
1.4.3 Baumhöhe und -breite sowie Baumalter	130
2 Verkehrssicherungspflicht bei Bäumen	147
3 Baumkontrollen	154
3.1 Geschichtliche Entwicklung der Baumkontrollen	158
3.2 Schadsymptome an Bäumen und Baumkontrollen	160
3.2.1 Pilzfruchtkörper holzerstörender Arten	166
3.2.1.1 Die 13 wichtigsten/gefährlichsten Pilzgattungen/Pilzarten an Stadtbäumen	176
3.2.1.2 Weitere, weniger gefährliche Pilzgattungen/Pilzarten an Stadtbäumen	209
3.2.2 Fäulebedingte Einwallungen / abgestorbene Rindenpartien	221
3.2.3 Tiefreichende Höhlungen	226
3.2.4 Zwiesel	230
3.2.5 Angebrochene Äste oder Stämme	240
3.2.6 Alte Spechthöhlen	247
3.2.7 Totäste in der Krone	250
3.2.8 Stammnahe, konzentrisch verlaufende und aufklaffende Bodenrisse	251
3.2.9 Hinweisende Symptome/Anzeichen und ihre Bedeutung für die Baumstatik	254
3.2.9.1 Hinweisende Symptome	254
3.2.9.2 Anzeichen im Baumumfeld	297
3.2.9.3 Brüchigkeit, höhere Gewalt	308
3.2.9.4 Lichtraumprofil und andere Rückschnittfordernisse	314
3.2.9.5 Verkehrssicherheitsrelevante und andere Charakteristika einiger Baumarten	316
3.3 H/D-Verhältnisse	322
3.4 Artenschutz in der Baumkontrolle	332
3.4.1 Vögel	338
3.4.2 Tiere in Höhlen und Spalten	352
3.4.3 Sicherung umsturzgefährdeter Bäume beim Vorhandensein geschützter Arten	361

4	Baumstabilisierungen	362
4.1	Wachstumserscheinungen bei Wurzeln	362
4.2	Wachstumserscheinungen an Stämmen und Ästen	365
4.3	Mechanische Sicherungssysteme	372
4.3.1	Baumstützen, Abspannungen und Verankerungen	372
4.3.2	Verschraubungen / Kronenanker	379
4.3.3	Verletzungsfreie Kronensicherungssysteme	380
5	Baumschutz auf Baustellen	383
5.1	Abgrabungen	386
5.2	Baumschutzzäune	389
5.3	Wurzelsuchgräben	391
5.4	Bauwerke	398
5.5	Stamm- und Kronenschäden	405
5.6	Wurzelvorhang	408
5.7	Bodenverdichtung und Bodenauftrag	409
5.8	Weitere mögliche Baumbeeinträchtigungen	416
5.9	Grundwasseränderungen	421
5.10	Wertermittlung bei Baumschäden	427
6	Statik und Festigkeitslehre	433
6.1	Belastung der Bäume durch Wind	433
6.1.1	Grundlagen	434
6.1.2	Windgeschwindigkeit	435
6.1.3	Windlast	439
7	Entwicklung statisch integrierter Prüfverfahren zur Stand- und Bruchsicherheits- bestimmung	453
8	Die AfB-Methode® zur Ermittlung der Standsicherheit von Bäumen	467
8.1	Kippverhalten von Bäumen	467
8.2	Grundlagen der AfB-Methode®	469
8.3	Geräte und Arbeitsschritte eines statisch integrierten Zugversuches	478
8.4	Langzeitauswirkungen von Eingriffen in das Wurzelfundament	491
9	Ermittlung der Bruchsicherheit von Bäumen	503
9.1	Grundlagen	503
9.2	Beschaffenheit der Tragwerkskomponenten	505
9.2.1	Form	505
9.2.2	Holzfestigkeit	507
9.3	Rechnerische Ermittlung der Bruchsicherheit	521
9.4	Zum Spannungsverlauf in einem Baumstamm	522
9.5	Das Widerstandsmoment an Stamm- und Astquerschnitten	525
9.6	Genaue Berechnung der Widerstandsmomente und der Spannung ausgefallter Stämme	531
9.7	Das Dilatometerverfahren zur Ermittlung der Bruchsicherheit von Bäumen	538
9.8	Bruchansatzgeräuschemessungen von Bäumen	541
9.9	Messmethoden zur Bestimmung von Restwanddicken	543
9.10	Nachweis der Baumstatik in Kletterwäldern	545
10	Kurzdarstellung wissenschaftlich begleiteter Feldversuche	551
11	Schlusswort	558
	Abbildungsverzeichnis	561
	Tabellenverzeichnis	585
	Bildautoren	587
	Literatur	588
	Register	603
	Über den Verfasser	615

Vorwort und Danksagung

Es kann ruhigen Gewissens behauptet werden, dass es die Baumstatik in ihrer heutigen Form niemals gegeben hätte, wenn mein Vater GÜNTER SINN[†] sie nicht im Jahr 1980, also vor mehr als 40 Jahren, erfunden hätte. Ganz bestimmt aber hätte es keine AfB-Methode und kein Dilatometerverfahren gegeben, die Inclino-methode wäre ebenso wie die Elastomethode niemals entwickelt worden.

Denn was viele heute nicht mehr wissen: GÜNTER SINN[†] ist der Begründer der Baumstatik. Als ein Mann, der das Betreten neuer Wege nicht scheute, sah er sich damals vor die Aufgabe gestellt, zur Standsicherheit von Straßenbäumen, in deren Standraum eine U-Bahn gebaut wurde, gutachtlich Stellung zu nehmen. Mit den zu dieser Zeit noch gängigen Bohrverfahren war das nicht zu leisten. Der Rest ist Geschichte. Alle, die sich heute mit dem Thema beschäftigen, verwenden Begriffe wie „Baumstatik“, „Windlastannahmen“, „statisch wirksamer Wurzelraum“ und andere Fachtermini, die vom Urgestein der Baumstatik, GÜNTER SINN[†], geprägt und mit Inhalten gefüllt wurden.

Dieses Buch ist ein Beitrag zum besseren Verständnis der „natürlichen Konstruktion Baum“.

Nach einem einführenden Kapitel zu den Grundlagen dieser und zu Anpassungen an die Baumstabilität, die sich im Laufe der Phylogenese herausgebildet haben, geht es unter die Erde, zum Baumfundament. Hier wird das Durchwurzelungsverhalten von Bäumen je nach den Bodenverhältnissen und dessen Auswirkungen auf deren Standsicherheit vorgestellt. Danach wird das Tragwerk des Baumes, der Spross, behandelt. Das Kapitel endet mit einer Vorstellung der maximalen Baumhöhen, -breiten, -stammdicken und Altersangaben je nach Baumart. Nachfolgend wird die Verkehrssicherheit von Bäumen, im Speziellen die rechtlichen Grundlagen und (Schad-)Symptombildungen an Bäumen sowie ihre Bedeutung für die Baumstatik und Baumkontrolle, thematisiert.

Der zunehmenden Bedeutung des Naturschutzgedankens in der Baumkontrolle und Baumpflege wird im darauffolgenden Kapitel „Artenschutz in der Baumkontrolle“ Rechnung getragen. Hier wird neben gesetzlichen Grundlagen vor allem auf die Tierarten und deren Lebensstätten eingegangen, die dem Baumkontrolleur und Baumpfleger im urbanen Bereich bei der Arbeit begegnen können. Im Anschluss erfolgt eine Vorstellung natürlicher und artifiziereller Baumstabilisierungen.

Dem vorbeugenden Baumschutz zur Vermeidung physiologischer und statisch relevanter Schäden widmet sich das nachfolgende Kapitel „Baumschutz auf Baustellen“, in dem auch die Wertermittlung von Bäumen in Schadensfällen behandelt wird.

Der daran anschließende Themenschwerpunkt des Buches widmet sich der Baumstatik, die im Jahr 1980 von GÜNTER SINN[†] als eigenes Fachgebiet begründet und in die Fachwelt eingeführt wurde.

Zunächst geht es darin um die mechanische Hauptlast, die Windbelastung der Bäume. Dann folgt ein geschichtlicher Abriss, der den an der Entwicklung der Baumstatik beteiligten Personen einen Namen gibt.

Mit der AfB-Methode kann die Standsicherheit von Bäumen über einen statisch integrierten Zugversuch zuverlässig geprüft werden. Deren Möglichkeiten und Grenzen, aber auch die Langzeitauswirkungen von Eingriffen in das Wurzelfundament, zeigt das nachfolgende Kapitel über die Grundlagen der AfB-Methode.



Abb. 1: GÜNTER SINN[†] bei der Untersuchung des großen Drachenbaumes (*Dracaena drago*) auf Teneriffa.

Der Ermittlung der Bruchsicherheit von Bäumen widmet sich das anschließende Kapitel, in dem sowohl die Grundlagen als auch Rechen- und Messverfahren aufgezeigt werden. Dabei spielen die Materialeigenschaften des grünen Holzes, auf die besonders eingegangen wird, eine tragende Rolle.

Das Buch stellt eine Gratwanderung vor allem zwischen der Lesbarkeit und der Form der

wissenschaftlichen Arbeit dar. Es werden nur die notwendigsten Quellen im Text, ansonsten am Schluss die verwendete und auch weiterführende Literatur angegeben. Dazu kommen eigenes Kopfwissen aus nicht mehr bekannten Quellen sowie empirisch gewonnene Erkenntnisse aus der eigenen Baumsachverständigentätigkeit sowie aus eigenen Forschungsarbeiten.

Danksagung

Zunächst möchte ich dem Verlag Quelle & Meyer für die Bereitschaft zur Veröffentlichung meines doch sehr speziellen Fachbuches danken. Den Herren KASCHINSKI und KLINK als meinen Ansprechpartnern danke ich dabei besonders.

Die Durchsicht der größten Teile des Manuskriptes haben liebenswürdigerweise Herr JAN-PHILIPP WAGNER, M. Eng. (Baumwelt Wagner GmbH & Co. KG, www.baumweltwagner.de), und Herr MICHAEL MÜLLER-INKMANN, M. Eng. (Sachverständigenbüro BAUM UND BODEN: www.baum-boden.de) übernommen. Ihnen verdanke ich viele wertvolle Anregungen und Korrekturen.

Außerdem hat ein Arbeitskollege aus Berlin, der leider nicht genannt werden möchte, einen weiteren Teil des Manuskriptes durchgesehen und mit seinen Anmerkungen verbessert.

Die Durchsicht des Kapitels 3.2.1 *Pilzfruchtkörper holzerstörender Arten* übernahm freundlicherweise Frau Mag. pharm. HERMINE LOTZ-WINTER, Abt. für Mykologie, Biologicum, Max-von-Laue-Str. 13, D-60438 Frankfurt am Main (Arbeitsgruppe Frau Prof. Dr. MEIKE PIEPENBRING). Für die fachlichen Anmerkungen und Verbesserungen danke ich sehr.

Die Durchsicht und umfassende Überarbeitung des Kapitels 5.10 *Wertermittlung bei Baumschäden* übernahmen netterweise Herr Dipl.-Ing. HERMANN SCHALL sowie Frau Dipl.-Ing. ANGELIKA TIEDTKE-CREDE, SVK Sachverständigen-Kuratorium e.V., Schäferbergstr. 7, 30539 Hannover, www.svkonline.de. Für die sachverständigen Korrekturen und Ergänzungen danke ich auch ihnen sehr.

Großer Dank gilt auch meinem Mitarbeiter, Herrn Forsting. FH (B. Sc.) WOLFGANG TURBA, der das Kapitel 3.4 *Artenschutz in der Baumkontrolle* gewissenhaft durchsah und wertvolle Anregungen gab.

Ganz besonderer Dank gilt meiner Frau PATRICIA SINN, durch deren Unterstützung die Verwirklichung dieses Buches erst möglich wurde.

Meine Wertschätzung gilt außerdem den Herren Dr. KRÜGER und FRITZ, Dr. MÄNNL und Dr. WALTER, die die unerlässlichen Baumstatikprogramme entwickelten, beziehungsweise an die fortwährend einfließenden Erkenntnisse aus der Berufsarbeit sowie aus Forschungsarbeiten anpassten. Außerdem gilt mein Dank Herrn Dipl.-Ing. OBERHACK, der unerschütterlich in langen Sitzungen die Anforderungen des Autors an ein praktikables Baumkontrollprogramm in die Realität umgesetzt hat.

Im Buch wurde zur besseren Lesbarkeit bewusst auf die (ergänzende) weibliche Form der Ansprache verzichtet. Hierfür bittet der Autor alle Kolleginnen, die einen zumindest genauso wertvollen Beitrag zum Baumerhalt leisten wie die Kollegen, um Nachsicht. Selbstverständlich sind auch ganz besonders die Kolleginnen in diesem Buch angesprochen.

Niddatal, im Dezember 2021
THOMAS SINN



Die „natürliche Konstruktion Baum“

1

„Die Natur macht nichts umsonst, und mehr ist umsonst, wenn weniger reicht; denn die Natur liebt die Einfachheit und mag nicht den Pomp überflüssiger Angelegenheiten.“

Isaac Newton, Principia

Bäume sind selbstorganisierende, lebende Bauwerke, die ein sehr hohes Alter und eine immense Größe erreichen können. Sie prägen ihre Umwelt in starkem Maße und üben zudem einen beträchtlichen Einfluss auf die Biosphäre aus. Deshalb besitzen sie für den Menschen nicht nur aus gestalterischen und ästhetischen Gründen, sondern auch unter ökologischen und ökonomischen Aspekten eine herausragende Bedeutung, zum Beispiel durch die Sauerstoff- und Holzproduktion.

Trotz ihrer oft beeindruckenden Schönheit und Erhabenheit muss die „natürliche Konstruktion Baum“ jedoch als Kompromissstruktur angesehen werden, die sich aus den Hauptfunktionen des Wachstums einschließlich der Photosynthese, der Wasserversorgung und Ernährung, der Bildung von Fortpflanzungsorganen, der Speicherung von Reservestoffen und Wasser und der mechanischen Stabilität ergibt. Dabei handelt es sich nicht um ein statisches Wirkungsgefüge, sondern es kommt

Abb. 2: Die „natürliche Konstruktion Baum“ als landschaftsprägendes Element.

im Laufe der ontogenetischen Entwicklung eines Baumes zu einer Verschiebung dieser vernetzten Funktionen. Da Wachstum und Stabilität zudem von unterschiedlichen Zelltypen bewirkt werden, sind sie häufig auch gegeneinander gerichtet, weshalb es eine „Optimalkonstruktion Baum“ nicht geben kann. Tatsächlich stellt jeder Baum in seinem Bestreben, den verschiedenen überlebenswichtigen Ansprüchen an seinen Organismus gerecht zu werden, eine „Optimalkompromisskonstruktion Baum“ dar.

Dies zeigt sich unter anderem im Hinblick auf die Stammausprägung und Bruchfestigkeit: Baumstämme sind in der Regel als massive Zylinder ausgebildet und in einem bestimmten Maß biegesteif. Bei hohlzylindrischen Stämmen wäre jedoch mit wesentlich weniger Materialaufwand fast die gleiche Biegesteifigkeit zu erreichen. Hier lassen zusätzliche Erfordernisse die einseitige Optimierung der Stabilität nicht zu und führen damit zu einem Kompromiss.

So hat die Vollholzigkeit gegenüber dem materialsparenden Hohlstamm-Bauprinzip, das fast nur noch aus fossilen Funden bekannt ist, vor allem zwei Vorteile: Sie erlaubt durch stabile Astanbindungen die Ausbildung sehr großer Kronen und es können innere Wachstumsvorspannungen genutzt werden, um die Sicherheit zu erhöhen und Material zu sparen.

Sehr eindrucksvoll veranschaulichen insbesondere tropische Baumarten den Ausgleich zwischen den Bedürfnissen der Mechanik und der Physiologie. Afrikanische Affenbrotbäume (*Adansonia digitata*) beispielsweise haben im Verhältnis zur relativ kleinen Krone und damit geringen Windlast weit überdimensionierte Stämme, die vornehmlich der Wasserspeicherung dienen. Besonders ausgeprägt ist das bei dem in Madagaskar heimischen *A. grandidieri*.

Wie Baumbrüche beweisen, hat das Baumkonstrukt auch wachstumsbedingte oder holzanatomische Schwachstellen. Deutlich sichtbar wird dies beispielsweise bei windbrüchigen Baumarten, zu denen unter anderem der Silberahorn (*Acer saccharinum*) zählt. Bei Grünastabbrüchen, die zum Beispiel typisch für Pappeln (*Populus* spp.) sind, kommt es ohne äußere Anzeichen und ohne eine Fäule im Innern zum Versagen belaubter Äste. V-förmige Vergabelungen mit eingewachsener Rinde stellen Schwachstellen dar, die infolge der geringeren mechanischen Anbindung der betreffenden Stämmlinge oder Äste in höherem Maße bruchgefährdet sind als stabile, U-förmige Vergabelungen.

Die Verkehrssicherheit eines Baumes ist gewährleistet, wenn er weder in seiner Gesamtheit noch in seinen Teilen eine vorhersehbare Gefahr darstellt. Dann sind sowohl seine Stand- als auch seine Bruchsicherheit gegeben. Hierbei beschreibt die Standsicherheit die ausreichende Verankerung des Baumes im Boden. Einfluss hierauf haben beispielsweise die Morphologie (Gestaltungsverhältnisse der Pflanzen) des Wurzelwerkes, der Zustand des Bodens und die Baumgröße und damit die Windangriffsfläche. Bruchsicherheit beschreibt die ausreichende Fähigkeit und Beschaffenheit des Baumes, dem Bruch von Stamm und Kronenteilen zu widerstehen. Einen wesentlichen Beitrag zur Bruchfestigkeit des massiven Holzkörpers leistet bei geschlossenen Stämmen die wachstumsbedingte innere Vorspannung. Bei Biegebelastungen gleicht sie bis zu einem gewissen Grad den Tragfähigkeitsunterschied zwischen der Druck- und Zugseite aus. Hinweise zur Verkehrssicherungspflicht bei Bäumen in Deutschland enthält das Kapitel 2.

Einen Überblick zur evolutionsgeschichtlichen Entwicklung von Bäumen in Bezug auf die Baumstabilität gibt das nachfolgende Kapitel 1.1 Baumstatik und Phylogenese.



Abb. 3: Grünastbruch aus einer Pappel-Hybride (*Populus × canadensis* spp.) bei Windstille.

Der Holzkörper eines Baumes weist unterschiedliche Festigkeiten auf, die mit divergierenden Spannungen einhergehen. Stark variierende Materialkennwerte, Holzfehler oder Wunden, dissipatives oder depressives Wachstum sowie wechselhafte dynamische Belastungen, vor allem ungleichmäßige Schwingungsbelastungen im Astbereich, verhindern insbesondere bei älteren Bäumen den Idealfall einer Spannungs Konstanz. Daraus

ergeben sich unterschiedliche Sicherheiten gegen Baumbrüche. Allerdings ist mit Ausnahme der in einem engen Verband wachsenden Waldbäume die Bruch- und Standsicherheit der „natürlichen Konstruktion Baum“ an geeigneten Standorten mit ausreichender Sicherheit gegenüber Orkanwindstärke ausgelegt. Dies gilt wegen des damage-tolerance-Prinzips jedoch nicht für Kronenteile.

1.1 Baumstatik und Phylogenese

Der Baum ist als standortgebundenes Lebewesen den von außen auf ihn einwirkenden Kräften, insbesondere dem Wind, in hohem Maße ausgesetzt. Durch die Dimensionen von Stamm und Krone ergibt sich die Windangriffsfläche des Baumes, die enorme Abmessungen erreichen kann (siehe Abb. 132 (S. 132) und Abb. 659 (S. 448)). Die Ausbildung eines voluminösen Baumkörpers bringt zwar biologische Vorteile, statisch gesehen wirft sie jedoch Pro-

bleme auf. Der Baum muss oberirdisch ein ausreichendes Traggerüst zur Selbststabilisierung und zum Abfangen möglicher Windlasten ausbilden. Unterirdisch ist eine entsprechend dimensionierte Boden-Wurzelmatrix vonnöten. Im Laufe der stammesgeschichtlichen Entwicklung der Bäume haben sich über Auslese verschiedene Anpassungen auch zur Optimierung der Baumstatik herausgebildet.

„Die Evolution bedeutet kein Fortschreiten in Richtung zu optimaleren Formen und Arten, da jede Form und jede Art für sich optimal bezüglich ihrer Funktion ist. Eine evolutionäre Veränderung kommt dadurch zustande, dass veränderte Anforderungen an die Funktion der biologischen Objekte oder an deren Teile gestellt wird“.

REINER, in BLETZINGER und KIMMICH, 1985

Die stammesgeschichtliche Entwicklung von Pflanzen und Tieren wird in Abhängigkeit der sich ändernden Umweltbedingungen von zwei Erscheinungen begleitet:

1. Struktur-Differenzierung, die von einer funktionellen Arbeitsteilung begleitet ist.
2. Anpassung der Strukturen und Funktionen an allerdings oftmals unklare Umweltfaktoren.

Dabei ist die Phylogenese (stammesgeschichtliche Entwicklung) immer nur eine Abfolge von Ontogenesen (Entwicklung des Einzelwesens von der Jugend- bis zur Altersphase) mit von Generation zu Generation an die Umwelt angepassten Änderungen im Rahmen des vorgegebenen genetischen Programms. Die erforderlichen Änderungen selber sind nur durch

einen genetischen Bildungsprozess, der über lange Zeiträume wirkt, möglich.

Die ersten Pflanzen auf der Erde waren wahrscheinlich Algen, die vor etwa 500 Millionen Jahren in Gewässern vorkamen. Erst mit dem Vordringen der Pflanzen an Land vor etwa 400 Millionen Jahren wurde die Ausbildung eines Stützgerüsts notwendig. Damit einher ging die Entwicklung von einfachen Konstruktionsmerkmalen zu immer komplexeren Strukturen.

Die Vorläufer der heutigen Nadelbäume, die sogenannten Progymnospermen, traten vor etwa 390 Millionen Jahren im Devon auf. Aus dieser ausgestorbenen Gruppe von baumförmigen Farnpflanzen entwickelten sich die Samenpflanzen. Die Stammkonstruktion dieser Baumvorgänger zeigen noch heute die Koniferen und fast alle Laubbäume auf (MOSBRUGGER, 1988).



Abb. 4: Ein urzeitlicher Wald, der in etwa schon in dieser Form existierte, als der Baumstandort im Bild noch zum Urkontinent Gondwana gehörte.

Siehe hierzu auch Kapitel 1.4 Das oberirdische Tragwerk.

Die ersten Nadelbäume oder Gymnospermen traten vor etwa 300 Millionen Jahren im Perm und Laubbäume oder Angiospermen vor etwa 100 Millionen Jahren im Tertiär auf. Die ersten Koniferen waren bereits nach Bauprinzipien gestaltet, die denen heutiger Nadelbäume sehr ähneln. Mit den stammesgeschichtlich jüngeren Laubbäumen ergibt sich generell eine fortgeschrittene Anpassung der inneren Strukturen an ihre wesentlichen Aufgaben, insbesondere der Wasser- und Nährstoffleitung sowie unter Umständen der Speicherung.

Durch gestiegene Ansprüche an die Wassernachlieferung entstanden im Laufe der Evolution Bäume mit wirkungsvollen Gefäßsystemen. Diese konnten sich bei ändernden Umweltbedingungen besser behaupten. Gleichzeitig wurde das Festigungssystem modifiziert. Für die Wasserleitungsfunktion ist eine Steigerung der Effizienz nachgewiesen, für die Festigungsfunktion verholzter Baumteile allerdings nicht. Es sind dennoch sehr wirksame, materialsparende Anpassungen an baumstatische Erfordernisse vorhanden.

Anpassungen von Bäumen an die Stabilität

Unter der Maxime möglichst schnell groß werden zu müssen und sich einen Platz am Licht zu sichern, können nur die Bäume ihre Erbanlagen weitergeben, die bei Stürmen gerade noch stabil sind. Die erfolgreichsten Bäume sind diejenigen, die den schmalen Grat zwischen möglichst schnellem und gerade noch

sicherem Wachstum perfektioniert haben. Tatsächlich haben „natürliche Konstruktionen“ nahe der Grenzgröße stets eine maximale Effektivität, gemessen an der Ausnutzung der Belastbarkeit des Materials. Eine Ausnahme von dieser Designregel bilden freistehende Bäume, die bei besserer Lastver-

teilung ohne Konkurrenzdruck mit erhöhten Sicherheiten wachsen können.

Als energie- und materialsparende Überlebensvorteile haben sich durch natürliche Auslese fast nur **passiv** wirksame Anpassungsmechanismen an die Stabilität herausgebildet. Diese sind im Wesentlichen

- die Windflucht,
- der vorgesehene Verlust von Baumteilen,
- die Anpassung der Stamm- oder Querschnittsform,

- die Materialanpassung,
- die Verkürzung der Sprossachsen bei mechanischem Stress,
- der Aufbau einer Vorspannung im Baumstamm durch Wachstumsspannungen,
- die Maximierung des Widerstandsmomentes bei Bäumen mit sekundärem Dickenwachstum,
- sowie der Drehwuchs. Bei fast keinem Baum wachsen die Fasern vom Stammfuß bis zur Krone genau parallel der Stammachse.

Siehe Kapitel 9.2.2.

Siehe Kapitel 9.5.

Siehe Kapitel 4.2.

Die Windflucht

Durch das elastische Nachgeben des Sprosses unter Windbelastung reduziert sich die Windangriffsfläche. Außerdem werden die Hebelarme verkürzt und die oberen Kronenteile durch das „Sich-Bücken“ aus dem oberen Windprofil mit höheren Windgeschwindigkeiten herausgenommen.

In der Praxis äußert sich dies durch merklich abnehmende Luftwiderstandsbeiwerte c_w bei zunehmender Windbelastung.

In der Biomechanik wird bei Bäumen unterschieden in Sicherheits-Strategen und Flexibilitäts-Strategen. Die Übergänge sind fließend. Die meisten Bäume folgen in ihrer Jugend und bis zum Erreichen des Bestandschlusses einer ausgesprochenen Flexibilitätsstrategie, da in dieser Phase äußerste Sparsamkeit beim Energie- und Materialverbrauch zugunsten maximalen Höhenwachstums erforderlich ist. Im Verlauf der Ontogenese ändert sich das bei den meisten Gattungen unserer Breiten. Ist das Höhenwachstum weitgehend abgeschlossen, folgen der Stamm und die Wurzeln der Sicherheitsstrategie, während die Krone weiterhin – baumartbedingt mehr oder weniger – der Flexibilitätsstrategie folgt.

Im Sturm reduzieren Bäume ihre Windangriffsfläche durch „Anlegen der Äste“ und ein „Sich-Bücken“; sie werden windschnittig. Bei maximalen Windgeschwindigkeiten ist mit einer Verminderung der Windangriffsfläche um bis zu 50 % zu rechnen. Dies ist je nach Baumart unterschiedlich stark ausgeprägt. So werden „weichkronige“ Flexibilitäts-Strategen, das heißt nachgiebige Baumarten wie zum Beispiel

die Pappel (*Populus* spp.), die Birke (*Betula* spp.) oder die Weide (*Salix* spp.), ihre Windangriffsflächen durch diesen Mechanismus in einem stärkeren Maße verringern können als „hartkronige“ Sicherheits-Strategen. Zu den letzteren gehören im Traggerüst starre Baumarten wie zum Beispiel die Robinie (*Robinia* spp.), die Rosskastanie (*Aesculus hippocastanum*) oder die Stieleiche (*Quercus robur*). Baumkronen unter Windlast verhalten sich nicht wie statische Gebilde, sondern sie schwingen. Die Baumkrone verändert durch ihre eigene sowie die Dynamik des Windes die angeblasene Fläche und das Volumen. In der Baumstatik wird das durch die Berücksichtigung der mit zunehmender Windlast abnehmenden Luftwiderstandsbeiwerte c_w berücksichtigt.

Siehe Kapitel 6.1.2
Windgeschwindigkeit.

Flexibilitätsstrategie

Hierzu konnten in einem Feldversuch während eines Sturmereignisses mit Windstärken von 8 nach BEAUFORT, in Böen bis Windstärke 9 nach BEAUFORT, an einem freistehenden Säulenpappel-Altbaum (*Populus nigra* 'Italica') Messungen vorgenommen werden.

Die Baumdaten zuvor bei Windstille: Gemessene Baumhöhe = 29,80 m, Stammumfang in ca. 1,3 m Höhe = 3,52 m, Windangriffsfläche = 157 m² (siehe Abb. 5), Windlastmoment bei Windstärke 12 = 719 kNm.

Während des Sturmereignisses wurde die Windangriffsfläche des Baumes erneut mit dem fotooptischen Verfahren nach G. SINN[†] bestimmt und laufend die sich verändernde Baumhöhe gemessen. Die Baumhöhe war um bis zu 3 m reduziert und die Windangriffsfläche betrug nach Computerauswertung der Fotografie nur noch 105 m² (siehe Abb. 6). Die Gesamt-Windlast der so verminderten Windangriffsfläche des Baumes betrug nur noch 432 kNm. Dies entspricht einer Abnahme der Windangriffsfläche um rund 33 % und der Windlast um rund 40 %.

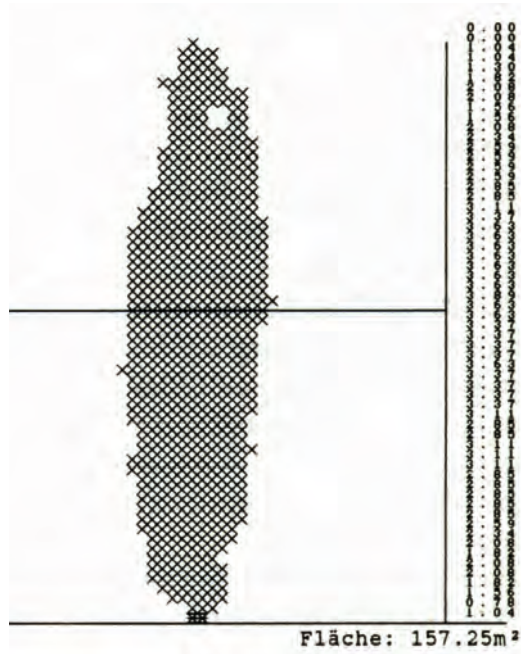


Abb. 5: Windangriffsfläche der Säulenpappel (*Populus nigra* 'Italica') bei Windstille.

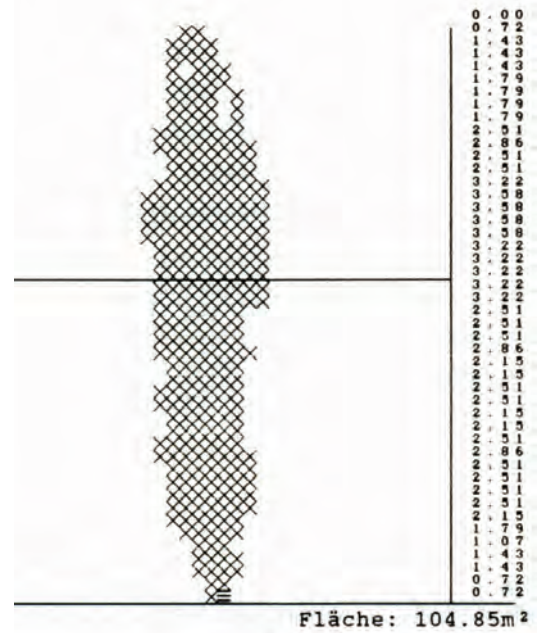


Abb. 6: Reduzierte Windangriffsfläche der Säulenpappel (*Populus nigra* 'Italica') bei Windstärke 8 bis 9.

Eine energie- und materialzehrende Sicherheitsstrategie macht bei Ästen und Zweigen keinen Sinn, da aufgrund des modularen Aufbaus der Bäume der Verlust von Baum-

teilen getragen werden kann, der Verlust des Gesamtorganismus aber nicht. Damit ergibt sich der nächste passive Anpassungsmechanismus.



Abb. 7: Wirksamkeit der Flexibilitäts-Strategie bei einer Birke im Eisregen.

Der vorgesehene Verlust von Baumteilen

Der Verlust von Kronenteilen bei zunehmender Windbelastung hilft in Ausnahmesituationen die Windlast zu reduzieren und so den Gesamtorganismus zu erhalten. KULL und HERBIG (1988) beschreiben das im Notfall vorgesehene

Aufgeben einzelner Einheiten, wie zum Beispiel von Ästen, ohne dass der Gesamtorganismus zugrunde geht, als „Modulprinzip“. Es ist mit der „damage tolerance“ der Leichtbautechnik vergleichbar.

„Die Taktik des Verringerens der Windangriffsfläche durch Abwurf von Zweigen, die für den Kronenaufbau und die Photosyntheseleistung nicht so wichtig sind (DEWIT 1992, HÖSTER 1968), lässt sich also auch bei Starkästen in Form von verschiedenen Bruchlasten beobachten“.
BECKER, BRÜCHERT, GENENZ und SPECK, 1997

Die Bruchsicherheit von tragenden Baumteilen hängt im Wesentlichen ab von (1.) (Wind-)Be-

lastung, (2.) Form und Dicke sowie den (3.) Materialeigenschaften.



Abb. 8: Vorgesehener Verlust von Baumteilen – Astbrüche in einer *Tilia cordata* nach sommerlichem Gewittersturm vor etwa 20 Jahren. Der Baum als Ganzes überlebte und ist heute wieder „normal“ begrünt.

Die Anpassung der Stammform und -dicke sowie der Querschnittsform

Die Evolution hat viele Stammformen hervorgebracht, von denen sich die runde, vollholzige mit sekundärem Dickenwachstum weltweit durchgesetzt hat. Eine Ausnahme sind die monokotylen Palmen, die sich in ihren Lebensräumen ebenfalls als eine sehr erfolgreiche Konstruktion beweisen konnten. Andere

Stammformen jedoch führten in eine evolutionäre Sackgasse. Sie verschwanden oder sind heute auf Standorte mit besonderen Lebensbedingungen beschränkt (siehe nachfolgend „Baumdesign in Abhängigkeit von Umweltbedingungen“).



Abb. 9: Palmen – hier in der Karibik – müssen sogar Hurrikans trotzen.

Die runde Stammform ist die optimale Anpassung an Belastungen aus allen Richtungen. Quadratische Sproßachsenquerschnitte finden sich nur bei kleinwüchsigen Kräutern wie zum Beispiel Salbei (*Salvia* spp.). Wie bereits ausgeführt, hat die Vollholzigkeit gegenüber dem materialsparenden Hohlstamm-Bauprinzip, das fast nur noch aus fossilen Funden bekannt ist, vor allem zwei Vorteile. Sie erlaubt durch stabile Astanbindungen die Ausbildung sehr großer Kronen und es können innere Wachstumsvorspannungen genutzt werden, um die Sicherheit zu erhöhen und Material zu sparen. Die Ausnutzung der Wachstumsvorspannungen ist bei vollholzigen Bäumen weit verbreitet und gilt in der Paläontologie als wichtiges Auswahlkriterium bei der natürlichen Selektion.

SCHWENDENER (1874), zitiert in MOSBRUGGER (1988), nennt als Designregel für optimale Baumstämme die Maximierung des Widerstandsmomentes des Stammquerschnittes, welches für Bäume mit sekundärem Dickenwachstum ebenfalls zutrifft.

An Wurzeln kann innerhalb der genetischen Veranlagung einer Baumart eine Änderung der Querschnittsform erfolgen. Ausgelöst wird das vor allem durch Bewegungsreize und hohe mechanische Belastung. Einige Baumarten zum Beispiel bilden ihre Wurzelanläufe zu regelrechten Brettwurzeln um. Gelegentlich lässt sich die Ausbildung von Starkwurzeln in Doppel-T-Trägerform beobachten.

Materialanpassung

Die Aufteilung in spezialisierte Festigungs- und Wasserleitungsgewebe hat sich in Bezug auf die Wasserleitung ebenfalls als Vorteil herausgebildet. Kompromissstrukturen, wie die Tracheiden der stammesgeschichtlich älteren Nadelbäume, sind sowohl bezüglich der Wasserleitungs- als auch der Festigungsfunktion keine optimalen Zellformen.

Generell können Pflanzen nur geringfügig die Dicke ihrer bereits ausgebildeten Stützgewebe an Stellen mit erhöhter Beanspruchung, insbesondere an der Stammbasis und in der Stammpерipherie, verbessern. Dies kann lediglich durch die Bildung dickerer Zellwände,

eine Veränderung des Faserwinkels in der sogenannten S2-Schicht der Zelle oder durch eine Zunahme der Dichte erfolgen. Es gelingt allerdings auch nur dann, wenn die Zellen noch nicht fertig ausgebildet sind. Nachgewiesen wurde dies bisher an dikotylen Bäumen, Palmen und bei Mais (MOSBRUGGER, 1988). Das sogenannte „Kompensationswachstum“, die auffällige Verbreiterung verholzter Baumteile in Bereichen innerer Fäulen, ist nach der Ansicht des Autors eine Wundreaktion. Mechanische Ursachen, vor allem ein spannungsgesteuerter Zuwachsprozess, müssen dabei weitestgehend ausgeschlossen werden.

Siehe hierzu auch Kapitel 9.4 Zum Spannungsverlauf in einem Baumstamm.

Verkürzung der Sprossachsen bei mechanischem Stress

KULL (1987) beschreibt vergleichende Versuche an Pflanzen, deren Wachstumsverhalten unter Stress (Regen, Wind) und ohne Stress untersucht wurde. Die stressbelasteten Pflanzen wuchsen vergleichsweise kompakter, da sie stets ihre Achsen und zum Teil auch die Blattstiele verkürzten. Der Vorgang wird

durch Wachstumshemmstoffe in der Pflanze gesteuert.

Durch einen kompakteren Wuchs, zum Beispiel an windexponierten Standorten, verringern Bäume effektiv die einwirkenden Belastungen durch Wind, Regen, Eis und Eigengewicht.

Baumdesign in Abhängigkeit von Umweltbedingungen

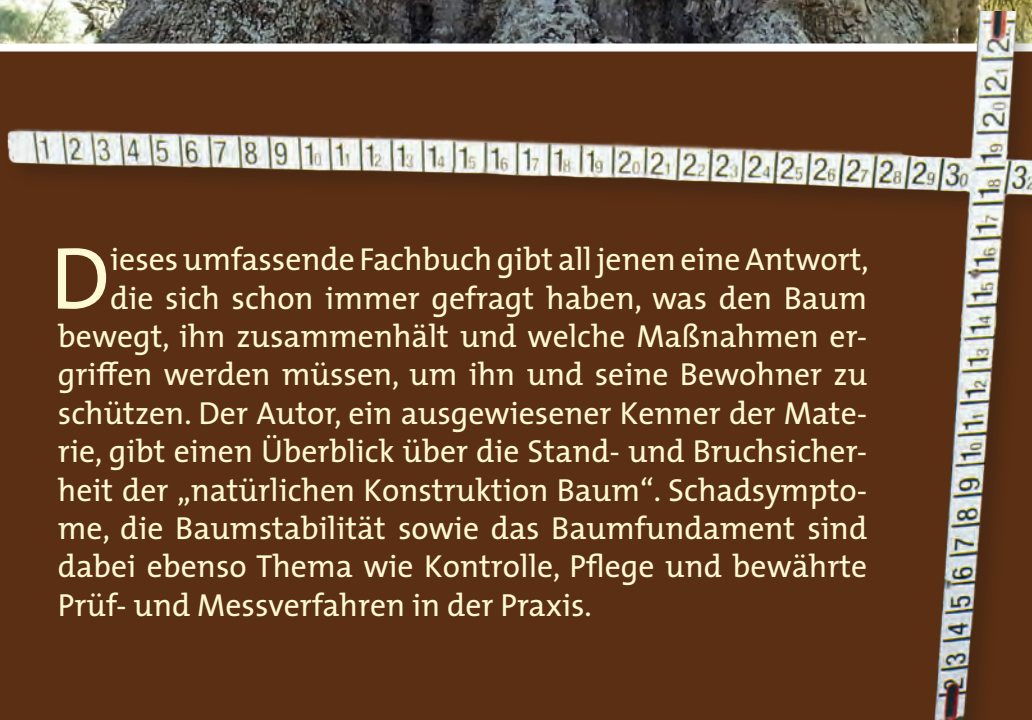
In den meisten Ökosystemen stellt die Ausbildung hoher Bäume mit ausgedehnten Kronen einen Konkurrenzvorteil dar. Das gilt für Standorte, an denen die maximale Gesamtgröße und die maximale Blattfläche von Vorteil sind.

Den vorteilhaftesten ökonomischen Einsatz von (Stütz-)Material bieten jedoch Hohlstämmе. Diese finden sich allerdings nur noch sehr selten, zum Beispiel in den Tropen. Hohlstämmе sind vor allem aus fossilen Funden bekannt.

Die Nachteile der Hohlstammkonstruktion überwiegen. Wie bereits ausgeführt, können sie keine inneren Wachstumsvorspannungen ausnutzen. Sie können auch keine großen Kronen ausbilden. Sie erreichen bei weitem nicht die Höhen und Kronendurchmesser von Bäumen mit vollholzigen Stämmen. Außerdem sind Hohlstämmе an den Ansatzpunkten der Seitenäste bruchgefährdet. Nur

bei abnehmendem Verzweigungswinkel und zunehmender Stammwanddicke nimmt die Bruchgefahr ab. Daher bringen die noch im Devon weit verbreiteten Hohlstämmе eine Reihe konstruktionsbedingter nachteiliger Sachzwänge mit sich, die ihre Wuchsform ganz erheblich einschränken. Aus diesem Grund konnten sie sich nicht durchsetzen (MOSBRUGGER, 1989).

Wenn zum Beispiel in einer Baumschicht keine Konkurrenz um Licht besteht und nur ökonomischer Materialeinsatz und eine schnelle Wachstumsgeschwindigkeit einen wesentlichen Konkurrenzvorteil darstellen, kann vereinzelt auch heute noch das Hohlstamm-Bauprinzip beobachtet werden. Der in den Tropen heimische, nur bis etwa 10 m bis 12 m hoch werdende Melonenbaum (*Carica papaya*) weist lediglich einen randlichen Stützzyylinder aus verholzter Borke (sekundäres Phloem) auf, während die übrigen Stammteile in ihrem Auf-



Dieses umfassende Fachbuch gibt all jenen eine Antwort, die sich schon immer gefragt haben, was den Baum bewegt, ihn zusammenhält und welche Maßnahmen ergriffen werden müssen, um ihn und seine Bewohner zu schützen. Der Autor, ein ausgewiesener Kenner der Materie, gibt einen Überblick über die Stand- und Bruchsicherheit der „natürlichen Konstruktion Baum“. Schadsymptome, die Baumstabilität sowie das Baumfundament sind dabei ebenso Thema wie Kontrolle, Pflege und bewährte Prüf- und Messverfahren in der Praxis.



www.quelle-meyer.de

ISBN 978-3-494-01922-2

Best.-Nr.: 494-01922