

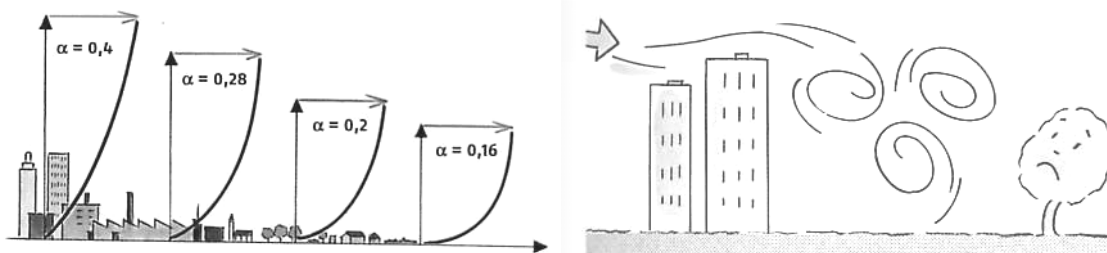
Windlasten, Schwingungsverhalten von Bäumen und dynamische Kronensicherungen

WESSOLLY, L.: 2. Beitrag Osnabrücker Baumpflegetage 2014 2./3. 9. 2014, Tagungsband

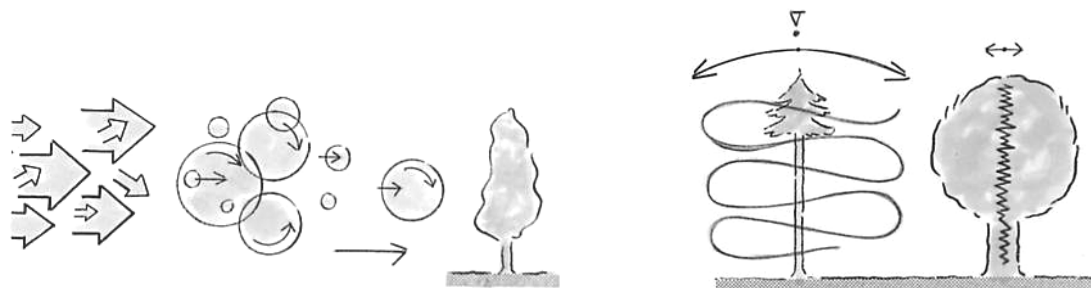
Der die Bäume betreffende Wind bzw. Sturm entsteht in einem Fall durch den Austausch von Luftmassen zwischen einem Hochdruck und einem Tiefdruckgebiet über einen längeren Zeitraum von einem halben Tag mit Maximalwind. Je höher die Druckunterschiede, und je näher beieinander, um, so stärker der Sturm. Im anderen Fall durch starke vertikale Aufwinde in einer **Gewitterwolke**, die ein horizontales Nachströmen der Luft nach sich zieht. Letzteres ist eine Sache von Minuten. Hinzu kommen hier noch drehende Winde mit vertikaler Drehachse und Fallwinde nach dem Abkühlen durch Regen, die in Bodennähe wiederum als Starkwinde die Bäume belasten. Bei starken Unwettern reihen sich die Gewitterwolken wie an einer Perlenkette hintereinander auf und durchziehen keilförmig ein größeres Gebiet, wie jetzt beim Pfingstunwetter in Düsseldorf bis Dortmund zu beobachten war. Im Schnitt wird eine deutsche Region in 16 bis 36 Tagen von Gewittern heimgesucht, 95 % davon zwischen Mai und September. Damit ist letztere Beanspruchung wesentlich häufiger, als die von klassischen Orkan ausgehende. Daher ist es auch unzulässig in der Lastanalyse klassische Windkarten z.B. aus der DIN zu Grunde zu legen, wie das in einigen käuflich zu erwerbenden Lastanalyseprogrammen zu finden ist. Denn der Gewittersturm kann aus jeder Richtung mit maximaler Last kommen.

Beide Austauschsysteme haben ihre Kerne in größeren Höhen in der unteren Atmosphäre. Dort gibt es keine Hindernisse, die die Geschwindigkeit bremsen könnten.

Die bodennahe Strömung erwartet allerlei Hindernissen: Berge, Gebäude, Bäume, die die Geschwindigkeit abbremsen. Man spricht hier von einer **Bodengrenzschicht des natürlichen Windes**. Direkt am Boden ist die Geschwindigkeit null, um in einigen hundert Metern je nach Versperrung die Geschwindigkeit der ungehinderten Strömung zu erreichen.



Da die Luft in diesen Geschwindigkeiten inkompressibel ist, versucht ein Luftvolumen bei der Umströmung eines bremsenden Hindernisses im freien Bereich schneller zu fließen. Man denke hier an einen Gebirgsbach, der größere Steine in seinem Bett umfließen muss.

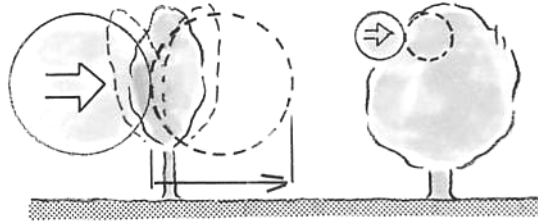


Wenn ein benachbarter Bereich schneller fließt, entsteht eine Rotation. Das Rad eines Fahrrades dreht sich oben nach vorn und unten nach hinten. Bei vielen Hindernissen in einer Strömung, sei es eine Flüssigkeit oder ein Gas wie Luft entstehen viele Rotationsgebilde, die mit der Grundströmung wegfließen.

Bleibt man weiter beim Fahrrad, kann man sich leicht vorstellen, dass gegenüber der unbewegten Umwelt die Geschwindigkeit des Reifens oben wesentlich höher ist, als die Geschwindigkeit des Fahrrades, während die Relativgeschwindigkeit des unteren Rades im Kontakt mit dem Boden ohne Schlupf immer 0 ist.

Der Orkan ist so ein Fahrrad. Es finden sich überhöhte Geschwindigkeiten, das nennt man dann **Böe** und danach oder daneben Phasen der absoluten **Ruhe**. Der Sturm ist nicht lautlos, Böen hört man mit zunehmender Lautstärke wie einen Zug kommen und auch wieder verschwinden.

Wenn man sich an dieses Klangbild erinnert, stellt man fest, dass die Böe 1 – 3 Sekunden anhält. Und das hat für unsere Bäume eine besondere Bedeutung s.u. Je höher ein Baum, umso langsamer schwingt er hin und her.



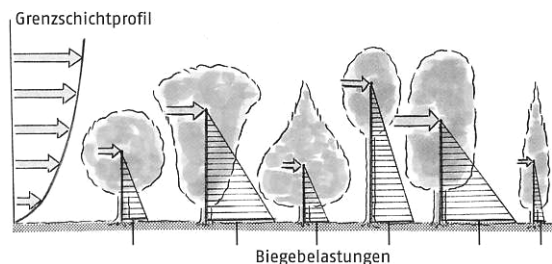
ENERGIE IN EINER BÖE IN ORKANGESCHWINDIGKEIT von 36 m/sec:			
Böendurchmesser m	Durchlaufzeit in der Krone sec	Resonanz Hz	Energie %
36	1	1	100
18	0,5	2	12,5
9	0,25	4	1,5

Das bedeutet aber auch, Bäume können im Windschatten stehen oder an einer besonders zugigen Stelle, die z.B. von einem schnell umströmten Turm oder einem Gebäude verursacht sind. Allerdings sollte man bedenken, dass ein Gewittersturm von allen Seiten kommen kann. Orkane kommen in unseren Breiten dagegen aus Südwest bis Nordwest.

Die bei uns auftretenden Winde sind in der Beaufort Skala von 1 – 12 beschrieben. Admiral Sir Francis Beaufort 1774 -1857 hat den Namen dafür gegeben. Da es noch keine Messgeräte gab, war das eine Klassifikation von Reaktionen zur See und auf dem Land auf die unterschiedlichen Windstärken. Die höchste Windstärke 12, bedeuten > 117 km/h bzw. 32,7 m/s. Im Jahr 1949 hat man dann diese Skala bis Windstärke 17 (202 km/h) erweitert, um auch die bei uns kaum vorkommenden Hurricane mit zu erfassen. Allerdings wurde Orkan Lothar auf Berggipfeln mit bis zu 200 km/h gemessen. Auch das Gewitterunwetter in NRW lag bei der Messstelle Flughafen Düsseldorf in 10 m Höhe mit 140 km/h darüber, wobei nicht zwingend diese eine Messstelle in Düsseldorf genau im Maximum gelegen sein muss. Das ist eher nicht der Fall.

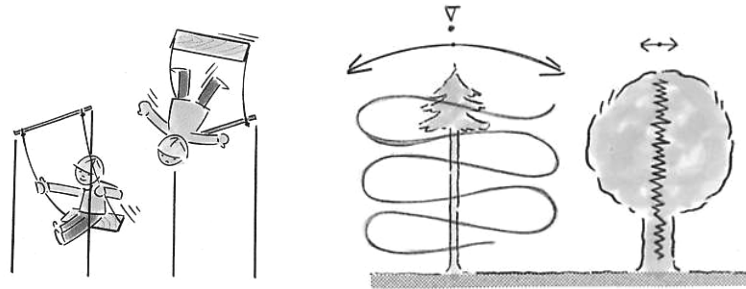
Das hieß, dass in unseren Breiten kaum höhere Windgeschwindigkeiten vorkommen. Das bedeutet aber auch, dass wir in der **Baumstatik** zur Erfüllung der **Verkehrssicherungspflicht** bei der Annahme von Windstärke 12 als Grenzwert dem Tragvermögen unserer Bäume gerecht werden. Die Annahme höherer Windlasten bei der Erfüllung der Verkehrssicherungspflicht würde uns zwingen, zu stark in die Krone einzugreifen. SIM (Elasto/Inclinomethode) und SIA (Statisch Integrierte Abschätzung der Baumsicherheit arbeiten mit dieser Grenze. Im Fall des Pfingstunwetters war mit mindestens 140 km/h diese Grenze allerdings örtlich überschritten.

Festzuhalten bleibt: Die Windgeschwindigkeit nimmt von unten nach oben zu. Große Bäume sind also stärker belastet, als niedrige. Und der Sturm ist dynamisch.



So ruhig ein Baum stehen muss, auch er ist dynamisch. Er kann tanzen. Am liebsten tanzen er oder seine Äste - die Wurzeln sind außen vor – in ihrem eigenen Rhythmus. Und der ist unabhängig von der Windgeschwindigkeit immer derselbe. Man nennt das **Eigenschwingung**. Anschauliche Beispiele für Eigenschwingungen sind das Pendel oder die Kinderschaukel. Bei einer Eigenschwingung genügen geringste Energieeinträge, eine Bewegung anzuregen. Man

denke an das Kind auf der Schaukel, das in der Lage ist, mit kleinsten Beinbewegungen eventuell 2 m hoch zu fliegen, vorausgesetzt es hält den Rhythmus der Schaukel ein.



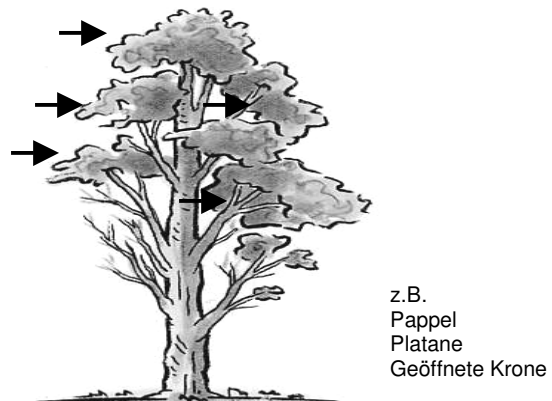
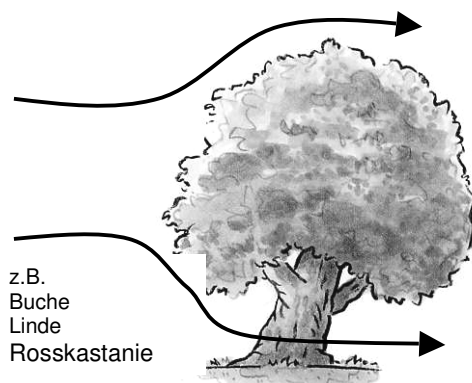
Ein Baum braucht Bewegung, um sich zu spüren, um zu spüren, ob vielleicht eine Schwachstelle besteht, die es zu kompensieren gilt. Leichte sommerliche Winde lassen die Bäume tänzeln. Schaut man dann in ihre Kronen, kann man mitzählen, wie viel Sekunden ein Baum oder ein Starkast braucht, einmal hin und her zu schwingen.

Man wird dann sehen, dass hohe Bäume im Wald 2 bis 4 Sekunden dazu brauchen. Das bedeutet, in eine Richtung bewegt sich der Baum 1 bis 2 Sekunden. Geht man zurück zur Böendauer s.u., findet man hier eine Übereinstimmung. Die Böe wirkt dann so lange, bis der Baum maximal ausgelenkt ist.

Das wird ein Baum in unseren Breiten normalerweise aushalten, wenn es eine einzige Böe ist. Aber die Böen in einem langanhaltenden Orkan kommen in unregelmäßigen Abständen hintereinander. Ist der Baum gerade auf seinem Rückweg und trifft die nächste Böe auf, wird die Baumbewegung gebremst. Ein Elastometer am Stamm würde die Dehnung 0 zeigen, obwohl gerade eine Hammerböe in die Krone fährt (die dann abreißen kann). Fatal kann es für den Gesamtbaum werden, wenn es sich gerade in der gleichen Schwingungsrichtung wie die nächste Böe befindet.

Dann kumuliert die Beanspruchung und es kann zum Bruch- oder Kippversagen führen. Je länger ein Orkan anhält, umso wahrscheinlicher ist, dass eine Übereinstimmung vorkommt. Das zeigt auch die Waldschäden nach einem Orkan, mit großen Flächen gleich alter, gefallener oder abgebrochener Bäume. Das bedeutet auch, dieses Versagen ist bei einem nur Minuten dauernden Gewitterorkan eher nicht gegeben. Im Sommer, in dem 95 % aller Gewitter in unseren Breiten stattfinden, kommt der schwingungsdämpfende Laubmantel hinzu.

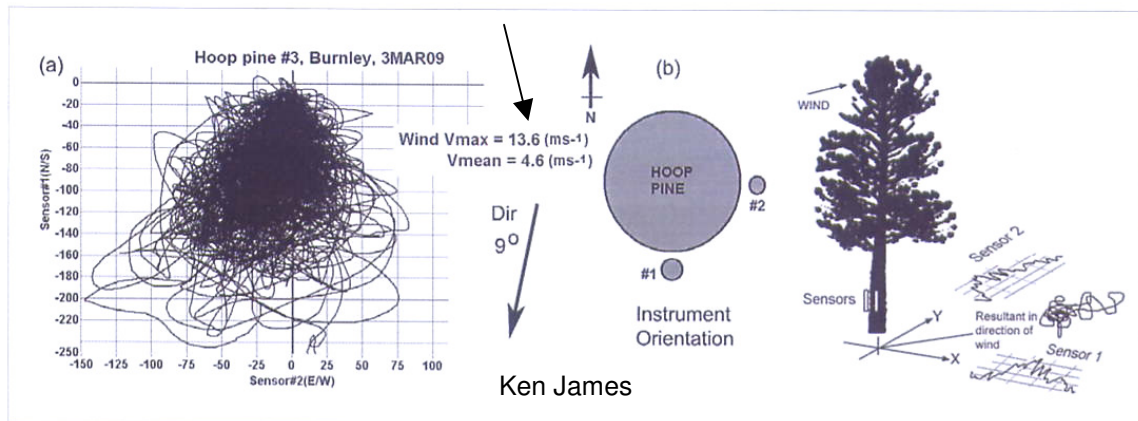
Die meisten freistehenden Solitärbaume schwingen sich wegen der Dämpfung durch den Blattmantel erst gar nicht auf. Der beste Schutz ist der geschlossene Kronenmantel, der den Sturm windschnittig um sich herum führt. Gefährlich wird es erst, wenn jeder Stämmling oder Starkast **freigestellt** dem Sturm ausgesetzt ist. Die Pappel war für ihre Anfälligkeit bekannt. Nach dem Pfingstorkan wissen wir, dass auch die Platane mit Astausbrüchen reagiert. Das mag an der Kronenarchitektur mit langen Ästen liegen. Die Auslichtung im Zug der Massariabaumpflege dürfte dieses Problem verschärfen. Man sollte hieraus die richtigen Schlüsse für den sicheren **Kronenaufbau** der Platane ableiten und die Baumpflege daran orientieren. Hybridpappeln sind für Verkehrsräume und Wohngebiete eher ungeeignet.



Zurück zu den Eigenschwingungen. Krone und Baum sind also schwingungswillig/eigenwillig. K. James, Melbourne und Chr. Spatz Freiburg haben mit dynamischen Versuchen an Bäumen darauf hingewiesen, dass ein selbständiges Eigenschwingen der Äste dazu führen kann, dass sich die Belastung für den Baum verringert. Eigene Messungen an Bäumen während der Orkane Vivian und Wiebke 1990 und bei Mistral auf Korsika hatten schon gezeigt, dass so gut wie nie der Zeitpunkt der Maximalböe mit der maximalen Baumbelastung zusammenfällt. Bei der Ableitung der Luftwiderstandsbeiwerte für Bäume (cw Werte) haben wir immer die Maximalwerte des Sturmes mit den Maximalwerten des Baumes in einen Zeitfenster von 10 Minuten korreliert.

Man erinnere sich an das obige Beispiel, in dem Böe und Baum sich aufeinander zu bewegen und in dem Moment die Belastung der unteren Baumhälfte 0 sein kann. Dann ist das Ergebnis von Ken James und CHR. Spatz auch für den Gesamtbaum nachvollziehbar. Man könnte also daraus schließen, man sollte den Baum nur lassen, dann wäre alles gut. Aber diese Erkenntnisse wurden bei mittleren Windgeschwindigkeiten gewonnen.

Ob das für Orkanlasten ebenfalls zutrifft, muss allerdings ernsthaft bezweifelt werden. Ken James zeigt in seinen Diagrammen eine maximale Windgeschwindigkeit von 13,2 m/s bei einer mittleren von 4,6 m/s (Windstärke 3). Im Orkan bei Windstärke 12 herrschen mit 32,7 m/s mindestens 2,5 mal so hohe Geschwindigkeiten. Da der Winddruck im Quadrat mit der Geschwindigkeit wächst, herrschen hier dann über $2,5^2 = 6$ mal so hohe Lasten. Die **Windenergie** ist ebenfalls mindestens 6 mal so groß. Bei der brachialen Böe von 3 Sekunden Dauer bleibt wenig Luft für die einzelnen Äste, munter ihr eigenes Spiel zu treiben. Sie werden einfach in eine Richtung gezwungen. Zur tänzelnden Eigenschwingung gehört immer eine hohe Freiheit. Sie ist im Orkan eher nicht gegeben.



Anm.: Baumreaktionen bei geringen Windgeschwindigkeiten können nicht auf die Situation brachialer Böen in einem Orkan übertragen werden.

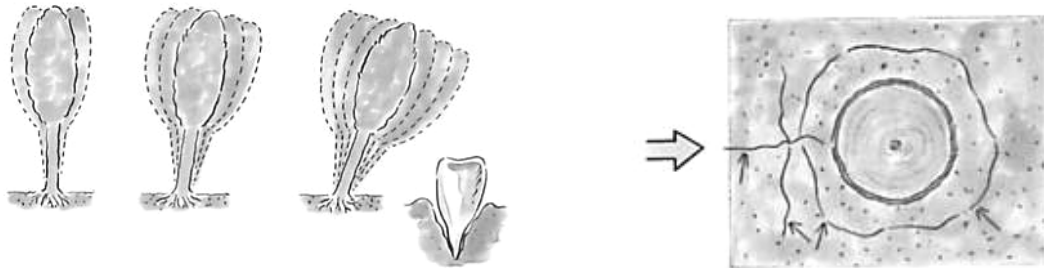
Kronensicherungen werden jedoch in erster Linie nicht dazu eingebaut, die Stambeanspruchung zu beeinflussen, sondern die Krone, bzw. Stämmlinge gegeneinander zu sichern, eine Ausbruchsfahrer zu vermeiden oder schlichtweg den Standraum gegen herunterfallende Äste zu sichern. Wenn als Nebenwirkung eine Erhöhung der Bruchsicherheitsbelastung auftreten sollte, muss man diese eben in Kauf nehmen. Durch SIA (*unter arboa.com kostenfrei anzuwenden*) kann man leicht abschätzen, ob sich dieser Baum genügend Grundsicherheit hat, um die mögliche Nebenwirkung zu ertragen. Aber wir haben oben aufgezeigt, dass die von Ken James ermittelten Werte kaum auf Orkanwindstärken übertragen werden können und dürften so eher akademischer Natur sein. Ein Aufschaukeln in der Eigenfrequenz bei mittleren Windgeschwindigkeiten bis zum Bruch oder Schlitzen eines Zwiesels kann sehr wohl durch eine Kronensicherung vermieden werden. Aber da spielt die Gesamtbelastung des Baumes keine Rolle.

Man kann auch keine Diskussion führen, ohne eine Betrachtung der beteiligten **Energie**. Wind ist geballte kinetische Energie $E = \frac{1}{2} m \cdot v^2$ (m Masse, v Geschwindigkeit). Am Baum setzt sie sich um in die Federenergie seiner Auslenkung $E = \frac{1}{2} F \cdot s$ (F Kraft, s Auslenkung) und die Verwirbelung an Ästen und Blättern (wiederum eine kinetische Energie, die in Wärmeenergie abklingt).

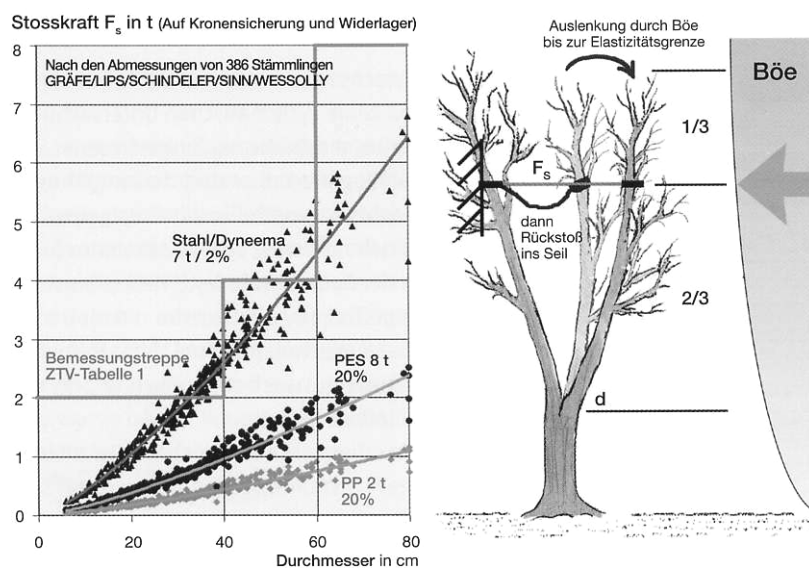
Wir haben mit den freien Kronenschwingungen über die vergangenen 25 Jahre eigene Beobachtungen gemacht: Der Sturm lenkt die Krone aus, die Auslenkung ist Kraft * Weg, also Energie. Daraus ergibt sich: Je elastisch nachgiebiger ein System ist, umso mehr Energie kann

mit der gleichen Kraft aufgenommen werden. Aus der Statik weiß man: unter Biegung gilt, halber Durchmesser gleich 16 fache Auslenkung. Das bedeutet, dass ein Zwiesel mit halbem Stämmldurchmesser gegenüber einem Baum mit durchgehender Terminale 16 mal so viel Energie aufnimmt. Das sollte man eigentlich vermeiden, um das Aufschlitzen des V Zwiesels zu verhindern.

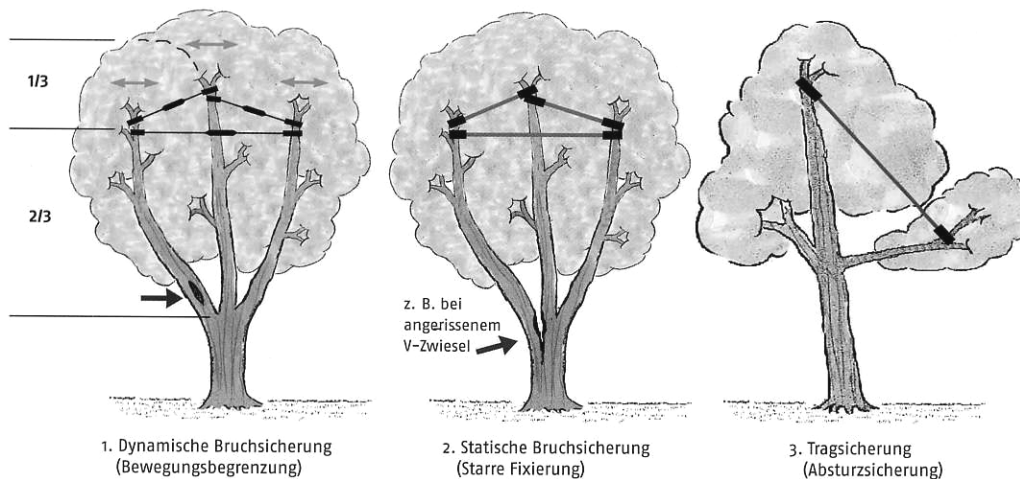
Wenn in einem System Energie steckt, muss es sie auch wieder loswerden. Bei einem Auto sind das die Bremsen. Beim Baum sind dämpfendes Blattwerk und die Reibbewegungen zwischen Wurzel und Erde die Energieumwandlungsbremse. Fehlt das Blattwerk, geht viel mehr in den Boden. Bei einem langanhaltenden Orkan kommt zu einem Dauerrütteln und schließlich zum Versagen der Standsicherheit. Anfällig hierfür sind Zwiesel und Kronenarchitekturen mit schlanken Stämmlingen, wie Silberlinde, Rosskastanie und alle Sekundärkronen mit Konkurrenztrieben. Es entstehen im statisch wirksamen Wurzelraum auf halbem Weg Risse und schlussendlich ein Standsicherheitsversagen.



Wenn man den Energieeintrag durch eine **dynamische Kronensicherung** reduziert, muss auch keine hohe Energie „vernichtet“ werden. Ein Ruckdämpfer lässt zudem Luft, dass die Stämmlinge in leichten sommerlichen Winden ihrem Eigentanz nachgehen, natürlich wachsen und eventuell Schwachstellen kompensieren können. Ohne Ruckdämpfer können sie das nicht, auch wenn das Seil weich ist. Das dämpft nur den Stoß. Spürt allerdings der Baum eine festhaltende Sicherung, führt das zu Fehlwachstum.



Was man kaum bedenkt, beim dynamischen System Baum verbessert eine dynamische **Kronensicherung** die **Standsicherheit**, weil sie den Energieeintrag reduziert. Dazu benötigt man nicht einmal hohe Traglasten der Sicherung. 2 to Systeme sind vollkommen ausreichend. Man denke an das Kind auf der Schaukel, das man mit einem Bindfaden daran hindern könnte, hoch hinauf zu schaukeln.



Die drei Sicherungsarten nach der neuen ZTV-Baumpflege-Kombinationen untereinander sind natürlich möglich.

Zusammenfassung

Orkane und Gewitterstürme sind dynamische Belastungen, die besonders im Waldbestand und bei Zwieseln den dynamisch reagierenden Baum gefährden können. Hier gibt es im Bereich der Böen und Baumgrößen Übereinstimmungen, die das Gefährdungspotential signifikant erhöhen. Darüber hinaus es gibt auch Wuchsformen, Kronenarchitekturen, die stärker gefährdet sind. Das hat besonders die Analyse der Schäden des Pfingstunwetters in NRW 2014 gezeigt, bei dem massenweise besonders Platanen und Pappeln ihre Kronen verloren haben. Geschlossene, dichte Kronen sind der beste Schutz.

Um die Verkehrssicherungspflicht § 823 BGB zu erfüllen, stehen Rückschnitt oder eine angepasste Kronensicherung zur Wahl, wie auch in der ZTV Baumpflege 2006 eingehend dargestellt.

Moderne **Kronensicherungen** sind ein hervorragendes Werkzeug, dem Baum einen übermäßigen Blattverlust durch Rückschnitt zu ersparen. Allerdings hat jeder Eingriff in ein komplexes System Folgen oder auch Nebenwirkungen. Das Auspendeln der Baumkronen ist nichts Neues und ist ein untergeordneter Aspekt der Sicherung dynamischer Schwingungssysteme. Einen Zwiesel sollte man bestimmt nicht ein und auspendeln lassen, dann schlitzt er an der Kerbe einfach auf. Kronensicherungen sollen die Krone gegen Ausbruch sichern. Dynamisch deshalb, um den Baum nicht in ein Korsett zu packen, das Fehlwachstum nach sich zieht. Wenn sich damit bei mittleren Winden die Last auf den Stamm erhöht, ist das ohne Belang. Denn bei mittleren Belastungen befindet man sich weit weg vom Versagenspunkt. Gewaltböen auf Solitärbäume, zumal in belaubtem Zustand, lassen ein Eigenleben der Einzeläste erst gar nicht zu.

Literatur

- FRITZ, W./WESSOLLY, L. : Gebäudeaerodynamik, Windkanaluntersuchungen, Diplomarbeit Universität Stuttgart 1974
- KRÖNKE, I. Untersuchungen im Windkanal über Gebäudeaerodynamik und Vorgänge in der atmosphärischen Grenzschicht, Der Bauingenieur 1973, S. 90-95
- JAMES, K. : Die Dynamik der Bäume im Wind, Baumzeitung 1/2013, S. 15
- JAMES, K.: Tree dynamics in winds, Jahrbuch der Baumpflege 2013
- SPATZ, CHR./BRÜCHERT, F./PFISTERER, J.A.: Wie reagieren Bäume auf Dynamische Windlasten oder wie können Bäume einer Resonanzkatastrophe entgehen ? Jahrbuch der Baumpflege 2007, S. 242
- WESSOLLY, L : Baumstatische Analyse der Frühjahrsorkane, Neue Landschaft 11/1991
- WESSOLLY,L.: Jahrhundertorkan Lothar - Lehren für die Beurteilung der Sicherheit von Bäumen, Neue Landschaft 2/2000
- WESSOLLY, L: Dynamische und statische Kronensicherungen sowie Trag/Haltesicherungen-Hinweis zum sachgerechten Einbau und Kontrolle, Jahrbuch der Baumpflege 2007, S. 252
- WESSOLLY, L./ERB, M.: Handbuch der Baumstatik und Baumkontrolle, Neuauflage Patzer 2014