

Grundlagen der Kronensicherung und Einsatzmöglichkeiten nach der neuen ZTV-Baumpflege

Basics of crown cabling and application options according to the new German standard „ZTV-Baumpflege“

von **Andreas Detter**

Zusammenfassung

Einbau und Kontrolle von Kronensicherungen stellen hohe Anforderungen an die Fachleute. In vielen Fällen sind sie jedoch sinnvoll und zielführend zur Gewährleistung der Verkehrssicherheit einsetzbar, vor allem wenn die Sicherheitserwartungen besonders hoch sind, das Risiko erst bei zukünftigen Kontrollen genauer beurteilt werden kann oder baum-schädigende Schnittmaßnahmen vermieden werden sollen. Die Eigenschaften der Sicherung müssen auf die Dynamik in der Baumkrone und die zu erwartenden Lasten abgestimmt werden. Hierbei geben biomechanische Erkenntnisse zum Schwingungsverhalten von Bäumen im natürlichen Wind und die lang-jährige Erfahrung mit der Nachgiebigkeit von Baumkronen, über die viele Baumkletterer verfügen, wertvolle Hilfestellungen.

Summary

Installation and inspection of cabling systems place high demands on arborists. However, they may be used sensibly and purposefully to minimize risks, especially if safety expectations are high, if the risk may be assessed more precisely in the future, or if adverse effects of pruning measures on tree health shall be avoided. The properties of the cabling system must match the dynamics in the tree crown and the expected loads. Biomechanical findings on the dynamic behavior of trees in natural wind provide guidance on this issue, just like the evidence that experienced climbers gather on the flexibility of tree crowns.

1 Einleitung

Immer wieder führen Anforderungen an die Verkehrssicherheit dazu, dass die Kronen alter Bäume stark eingekürzt werden. Infolge des Verlustes an Blattfläche und der entstehenden Schnittwunden kann dies ungünstige Auswirkungen auf den Erhaltungszustand der betroffenen Bäume haben. In vielen Fällen lässt sich die Bruchsicherheit durch den Einbau von Kronensicherungen jedoch auch ohne solche Eingriffe gewährleisten.

Im Zuge der Überarbeitung der ZTV-Baumpflege (Ausgabe 2017) wurde auch das Thema Kronensicherung

umstrukturiert. Die Eigenschaften des verwendeten Materials (Kap. 2) und die Vorschriften zur Ausführung (Kap. 3), die mit Vereinbarung der ZTV vertraglich gelten, wurden dabei klar von detaillierteren Angaben getrennt, die gesondert für den Einzelfall ausgeschrieben werden müssen (Kap. 0). Hieraus entstehen erhöhte Anforderungen an die Ausschreibenden, da sie Festlegungen treffen müssen, die zuvor meist dem Anbieter überlassen waren. Wenn vom Regelfall abgewichen werden soll, sind solche Angaben jedoch für eine eindeutige und kalkulierbare Leistungsbeschreibung sowie als belastbare vertragliche Basis für die Ausführung und Abrechnung der Arbeiten unverzichtbar.

Allerdings enthält die ZTV-Baumpflegerische als Regelwerk naturgemäß keine ausreichenden Informationen, wie eine Kronensicherung gestaltet werden sollte, um das Sicherungsziel zuverlässig, baumschonend und zugleich wirtschaftlich zu erreichen. Im informativen Anhang B sind lediglich erfahrungsbasierte Empfehlungen für Mindestbruchlasten vorhanden, die sich nach dem Durchmesser des zu sichernden Kronenteils richten. Tatsächlich können aber Abweichungen von dieser sog. Bemessungstreppe wichtig sein, um Kronensicherungen angemessen und sinnvoll zu dimensionieren.

Dieser Beitrag soll die technischen und biomechanischen Grundlagen umreißen, um die Rahmenbedingungen für einen fachgerechten Einbau von Kronensicherungen aufzuzeigen und um zu erklären, wie ihre Funktionsweise durch eine zielgerichtete Anpassung an die Beschaffenheit der Baumkrone im konkreten Einzelfall verbessert werden kann.

2 Grundlagen

2.1 Einsatzmöglichkeiten

In der baumpflegerischen Praxis gibt es grundsätzlich viele Einsatzmöglichkeiten für Kronensicherungen. Vor allem dienen sie zur Sicherung bruchgefährdeter Zwiesel und Gabelungen sowie einzelner erhöht bruchgefährdeter Kronenteile. Sie werden aber auch verwendet, um Altbäume abzuspannen bzw. auf andere Bäume rückzuverankern oder um Jungbäume zu stabilisieren. Der Standardfall ist die Sicherung eines Zwiesels mit konkurrierenden Stämmlingen. Während bei Jungbäumen diese ungünstige Kronenentwicklung noch durch Schnittmaßnahmen korrigiert werden kann, sind Schnittmaßnahmen bei Bäumen in der Reifephase oder bei Altbäumen hier weniger zielführend. Vielfach können Bäume V-förmige Gabelungen auch durch erhöhtes Dickenwachstum auf Höhe des Rindeneinschlusses ausreichend verstärken, so dass sie keine konkrete Gefahr darstellen (WÄLDCHEN 2007). Genau diese Reaktionsholzbildung wird aber möglicherweise unterbunden, wenn Schnittmaßnahmen zu stark in die Physiologie des Baumes eingreifen.

Anders liegt der Fall, wenn die Korrektur der Wuchsform noch möglich und für die langfristige Entwick-

lung des Baumes sinnvoll ist. Dann wäre eine Sicherung allein nicht der richtige Weg, um einer erhöhten Bruchgefahr zu begegnen. Wenn z. B. weit ausladende Stämmlinge ungünstig angebunden sind und aufgrund der Kronenarchitektur immer weiter nach außen wachsen, könnte eine Kronensicherung zwar das Versagensrisiko vermindern, aber wenig zur nachhaltigen Entschärfung der Situation beitragen. Die ZTV-Baumpflegerische in der derzeit gültigen Fassung weist auf die grundsätzliche Frage hin, ob Sicherungsziele besser durch eine Kronensicherung, durch einen Kronenschnitt oder durch eine Kombination beider Maßnahmen erreicht werden können.

Das Sicherungsziel unterscheidet sich bei Bruchsicherungen und den sog. Trag-/Haltesicherungen. Während erstere dem Bruch vorbeugen sollen, sind letztere nur dazu gedacht, die gesicherten Teile nach dem Bruchversagen in der Krone zu halten. Darüber hinaus kann aber auch nach der geplanten Funktionsdauer differenziert werden. In einigen Fällen ist eine dauerhafte Minimierung des Risikos erforderlich, insbesondere falls der Baum die festgestellte Gefährdung voraussichtlich nicht mehr kompensieren kann. Hierfür wären Materialien mit langer Lebensdauer besser geeignet, vor allem wenn sich der Baum bereits in der Alterungsphase befindet und keine maßgebliche Veränderung der Baumhöhe oder des Kronenaufbaus zu erwarten ist.

Andererseits ist häufig zunächst eine temporäre, also zeitlich begrenzte Sicherung ausreichend, z. B. wenn die weitere Entwicklung des Baumes abgewartet werden soll. Hierfür bieten sich Produkte an, die nach einer gewissen Einsatzdauer ersetzt werden müssen, weil ihre Zeitstandsfestigkeit¹ materialbedingt auf acht bis zwölf Jahre begrenzt ist. Daher sind moderne textile Kronensicherungen ein geeignetes Mittel, um auch vorübergehende Unsicherheiten bei der Einschätzung des Versagensrisikos oder temporär erhöhte Sicherheitsanforderungen abzusichern. Folgende Beispiele sind hierfür denkbar:

- Überprüfung unklarer Defektsymptome im Zuge weiterer jährlicher Kontrollen

1) Zeitstandsfestigkeit ist der Zeitraum, über den der Hersteller die volle Funktionstüchtigkeit des Produktes im zugeordneten Einsatzbereich gewährleisten kann. Dies setzt voraus, dass Bruchlast und Dehnbarkeit der Kronensicherung die zugesicherten Angaben des Herstellers auch unter Bewitterung noch erreichen.

- Zeitgewinn während der Baum auf Schwachstellen durch Zuwachs reagiert
- Erhöhung der Sicherheitsreserven bei Veränderungen im Baumumfeld, z. B. nach Freistellungen oder bei zeitweilig erhöhter Sicherheitserwartung.

Viele Sicherungspflichtige zögern allerdings, einmal eingebaute Kronensicherungen wieder zu entnehmen. Grundsätzlich könnten ausreichend dehnbare Verbindungen auch nach der Einsatzdauer durchaus in der Krone belassen werden. Im Hinblick auf eine Haftung im Versagensfall muss natürlich nachvollziehbar belegt werden, warum sie ab einem bestimmten Zeitpunkt nicht mehr gewartet und ersetzt wurden. Dies setzt den Mut voraus, der Zuverlässigkeit der eigenen Beurteilung zu vertrauen, ebenso wie den Willen, die finanziellen Mittel des Baumeigentümers verantwortlich zu verwalten. Bei dauerhaften Einschränkungen der Verkehrssicherheit kommen Sicherungen vor allem dann in Frage, wenn alternative Lösungen stark baumschädigend wären. In solchen Fällen sollte berücksichtigt werden, dass dabei zumindest im Fall von Sicherungen aus Kunststoffen ein regelmäßiger Austausch der Verbindungen in Kauf genommen werden muss.

2.2 Technische Eigenschaften von Kronensicherungen

Ein wichtiger Beweggrund für die Entwicklung der textilen Kronensicherungen ab Ende der 1980er Jahre (SINN 1989) war zunächst vor allem die Vermeidung der Schäden am Holzkörper, die infolge des Einsatzes von Stahlankern als Anschlagpunkte entstanden (STOBBE et al. 2000). Diese invasiven Anbindungen sind nun mit der neuen Ausgabe endgültig aus der ZTV-Baumpflege verschwunden, während sie in anderen Ländern noch zum festen Repertoire der Baumpflegeindustrie gehören (SMILEY & LILLY 2007). Begründet wird dies dort zum einen mit der höheren Dauerhaftigkeit der Stahlsysteme, zum anderen wird die Fäulnis an Stahlankern auf technisch nicht korrekten Einbau (SMILEY 1998) bzw. schlecht abschottende Baumarten (KANE & RYAN 2002) begrenzt.

2) Der Begriff Kronensicherungssystem wird teils auf Produkte, teils auf fertige Installationen im Baum angewendet. Daher bietet er sich nicht zur eindeutigen Unterscheidung der technischen Eigenschaften an.

Die umschlingenden Befestigungen moderner Kronensicherungen haben gegenüber Stahlbolzen den Nachteil, dass sie nicht ohne weiteres auf freier Strecke angebracht werden bzw. im Lastfall am Stamm verrutschen können. Daher ist die Positionierung der Befestigung nicht immer variabel. Andererseits sind textile Kronensicherungen dehnbare und lassen eine gewisse Schwingbreite bei Niedriglast zu (WESSOLLY & VETTER 1995). Dies soll sicherstellen, dass der natürliche Wind noch Wachstumsreize auslöst, die für die baumeigene Kompensation einer Schwachstelle erforderlich sind und durch vollständiges Ruhigstellen unterbunden würden (KANE & AUTIO 2014). Möglicherweise lösen aber nur außergewöhnlich hohe Windeinwirkungen (BONNESOER et al. 2016) und starke Biegung (ROIGNANT et al. 2018), die Kronensicherungen vielfach unterbinden (SINN 2009b), das adaptive Wachstum aus.

Die technischen Eigenschaften von Kronensicherungen lassen sich nach vielen Gesichtspunkten unterscheiden (SINN & SINN 2005). Kronensicherung ist eine allgemeine Bezeichnung, die ähnlich wie Kronenschnitt viele Maßnahmen und technische Möglichkeiten umfasst. Für eine klare systematische Unterscheidung der Anforderungen auf mehreren Ebenen, die sich nicht vermischen, bieten sich vier übergeordnete Begriffe an: Verwendung, Anordnung, Verbindung und Befestigung. Aus der geplanten Verwendung der Kronensicherung ergibt sich eine sinnvolle Anordnung für eine oder mehrere Verbindungen, die in bestimmter Weise am Baum befestigt werden sollen². Tabelle 1 veranschaulicht die Unterscheidungsmöglichkeiten.

Viele technische Eigenschaften sind für ein bestimmtes Sicherungsziel nützlich, für ein anderes aber kontraproduktiv (WESSOLLY 2005). Daher hat die Frage, was durch die Kronensicherung erreicht werden soll, zentrale Bedeutung für die weiteren Betrachtungen. Die geplante Verwendung sollte daher am Anfang jeder Maßnahmenplanung festgelegt und entsprechend in der Ausschreibung oder Dokumentation eindeutig kommuniziert werden. Selbstverständlich können in einem Baum auch mehrere Sicherungsziele angestrebt werden, z. B. wenn Zwiesel gegen Bruch gesichert und zudem ausladende Starkäste in der Krone gehalten werden sollen.

Tabelle 1: Unterscheidungsebenen und -merkmale bei Kronensicherungen

Ebene	Merkmal	Optionen, Alternativen, Beispiele
Verwendung	Einsatzdauer	zeitlich begrenzt (temporär) – dauerhaft (permanent)
	Sicherungsziel	Bruchsicherung – Trag-/Haltesicherung – kombiniert
Anordnung („System“)	Verbundart	Einfach-Verbindung – Dreiecksverbindung(en) – Verbund
	Ausrichtung	in etwa horizontal – geneigt – so vertikal wie möglich
	Einbauhöhe	Höhe der Sicherungsebene, Anzahl der Ebenen
Verbindung	Bauart („System“)	Hohltau – Gurtband – mehrere Komponenten
	Dehnbarkeit	dynamisch (nachgiebig) – statisch (starr)
	Material/Baustoffe	Kunststoffe (PA, PE, PES, PP, Dyneema/Vectran), Stahl
	Bruchlast	2 t – 4 t – 8 t – individuelle Bemessung
	Zusatzkomponenten	Federelemente/Ruckdämpfer, Schäkel, Wantenspanner
Befestigung	Anbindung	Breite der Auflagefläche, Scheuerschutz
	Positionierung	an Gabelungen – frei am Stämmeling

Bei der Planung müssen als weitere wichtige Faktoren der individuelle Kronenaufbau des zu sichernden Baumes sowie die Art und Position der zu sichernden Defekte berücksichtigt werden. Hieraus ergibt sich insbesondere, ob einfache oder komplexe Systeme erforderlich sind. Die endgültige Anordnung der Verbindungen ist vielfach erst in der Krone, d. h. im Zuge der Ausführung möglich. Dies setzt der exakten Planung gewisse Grenzen, entbindet den Auftraggeber aber nicht von der Verpflichtung, eine umfassende und eindeutige zu erstellen. Je komplexer die Kronenstruktur und die vorhandenen Schäden sind, desto aufwändiger gestaltet sich eine zielführende Kronensicherung.

Nur wenige wissenschaftliche Arbeiten haben sich bislang mit komplexeren Sicherungssystemen beschäftigt (z. B. GRECO et al. 2004), obwohl diese in der Praxis vielfach verwendet werden. Die Fachliteratur zur Baumpflege geht zwar regelmäßig auf Kronensicherungen ein. Dort finden sich aber zumeist nur einfache Grundprinzipien, die eine gewisse Verunsicherung bei der Anwendung auf den speziellen Fall oft nicht ausräumen können. Um Kronensicherungen als geeignetes Instru-

ment zur Gewährleistung der Verkehrssicherheit einzusetzen, sind jedoch ein fachgerechter Einbau ebenso wie eine sachgerechte Kontrolle der Funktionsfähigkeit und Wartung der Sicherungen unverzichtbar.

2.3 Mechanische Funktionsweise von Kronensicherungen

Statische Bruchsicherungen und Trag-/Haltesicherungen sollen in der Regel starr, also wenig nachgiebig sein, um die Krone ruhig stellen zu können bzw. die Belastungen im Versagensfall zu minimieren. Sie müssen daher die auftretenden Kräfte weitgehend abgreifen und innerhalb der Krone übertragen können, ohne eine Bewegung der gesicherten Teile zuzulassen. Dabei nehmen die Verbindungen aber nur Zugkräfte auf, so dass sich die gesicherten Teile noch immer aufeinander zu bewegen und in einem ungünstigen Fall beim Zurückfedern hohe Spannungsspitzen in der Sicherung entstehen können. Daher werden statische Verbindungen generell mit deutlich höherer Bruchbelastbarkeit eingebaut als dynamische.

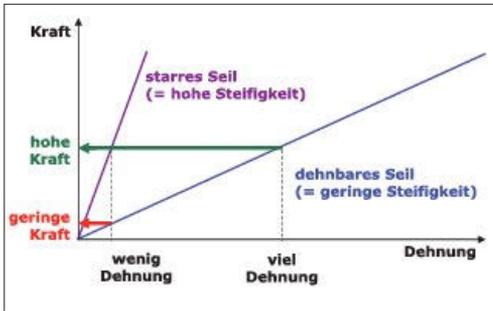


Abbildung 1: Kraft-Dehnungsdiagramm für starre und dehnbare Seile

Beim Sicherungsziel der dynamischen Bruchsicherung steht die Nachgiebigkeit des Systems im Vordergrund. Dehnbare Seile können zwar Federenergie speichern und so Lastspitzen abdämpfen (DETTNER et al. 2005). Andererseits können sie ihre Tragfähigkeit aber nur dann entwickeln, wenn sie sich dehnen dürfen. Falls an der Stelle, an der eine Sicherung angebracht ist, nur eine geringe Auslenkung des Stämmchens auftritt, wären dehnbare Systeme kaum in der Lage, den Bruch zu verhindern. Dies wäre zum Beispiel dann der Fall, wenn die Sicherung aufgrund der Kronenstruktur (z. B. bei Ständerbildung) an einem Stämmchling mit großem Durchmesser erfolgen muss. Das Seil könnte die Gegenkraft, die erforderlich wäre, um die Bewegung des Kronenteils einzuschränken, erst bei größerer Seildehnung aufbauen. Ist das Seil kaum gedehnt, leistet es noch wenig Widerstand. Demgegenüber nimmt ein starres Seil auch bei geringer Auslenkung der Stämmchlinge bereits hohe Kräfte auf.

Dies veranschaulicht der Seilmodul im Kraft-Dehnungsdiagramm (Abbildung 1). Üblicherweise liest man das Diagramm so, dass eine bestimmte Kraft bei einem starren Seil eine geringe Dehnung und bei einem dehnbaren Seil eine entsprechend größere Dehnung hervorruft (hohe Steifigkeit³ – geringe Steifigkeit). Dies ist aber auch anders herum möglich: Das dehnbare Seil kann bei einer bestimmten Dehnung

3) Bei Seilen spricht man üblicherweise vom sog. Seilmodul, der dem Elastizitätsmodul anderer Stoffe entspricht. Er ist ein Maß dafür, wie viel Kraft theoretisch erforderlich wäre, um die Länge des Seiles zu verdoppeln (GORDON 1984). Dies ist bei Bungee-Seilen durchaus möglich, andere Seile würden aber vorher bereits reißen.

nur eine viel geringere Haltekraft aufbauen als das starre Seil.

Dieser Zusammenhang erklärt auch, warum eine Parallelführung von statischen und dynamischen Verbindungen nicht möglich ist. Solange noch eine intakte statische Sicherung vorhanden ist, zieht diese immer die Last auf sich, weil das Material bereits mit kurzem Dehnungsweg hohe Gegenkräfte aufbauen kann. Soll eine alte Stahlseilverbindung wegen ihrer ungeklärten Restbelastbarkeit auf gleicher Höhe gedoppelt werden, muss hierfür zwangsweise ein weiteres Stahl- oder ein Dyneemaseil verwendet werden. Eine flexible Verbindung als zusätzliche Sicherung könnte allenfalls deutlich höher in der Krone angebracht werden, wo unter Lasteinwirkung ausreichende Dehnungswege möglich sind.

2.4 Erfahrungen im praktischen Einsatz

Die klare Trennung zwischen dem Sicherungsziel der Bruchsicherung („Verhindern des Ausbruchs“) und der Trag-/Haltesicherung („Schutz gegen Herabfallen“) steht zwar am Anfang der Planung, vermischt sich jedoch in der Praxis. Tatsächlich waren Bruchsicherungen oft zumindest in der Lage, die gebrochenen Teile in der Krone zu halten, selbst wenn sie deren Versagen aufgrund außergewöhnlich hoher Windkräfte nicht verhindern konnten. Andererseits deuten die dem Autor bekannt gewordenen Versagensfälle aber darauf hin, dass regulär dimensionierte Trag-/Haltesicherungen häufiger als Bruchsicherungen ohne erkennbare Überlastung versagen.

Woran dies liegt, lässt sich nur vermuten. Einerseits fehlen zuverlässige Gewichtsangaben für zu sichernde Äste, andererseits können bei Starkwind ausladende Äste offenbar durch eine Auslenkung nach oben versagen (SHIGO 1991), so dass die Sicherungen zunächst nicht wirksam sind. Sollte der nach oben gebogene Ast vollständig abbrechen, könnten unter Umständen extrem hohe Kräfte auftreten (TESARI et al. 2003). Eine höhere Dimensionierung erscheint daher bei Trag-/Haltesicherungen durchaus sinnvoll, da ohnehin eine möglichst starre Verbindung zielführend ist. Bei Normallast kann der gesicherte Ast noch immer seitlich ausschlagen; dies ist ohnehin die am häufigsten auftretende Reaktion im natürlichen Wind (JAMES 2002).

Auch um der Reduktion der Bruchlasten durch Umwelteinflüsse Rechnung zu tragen, ist eine gewisse Überdimensionierung erforderlich. Die Angaben zur Festigkeitsabnahme unterscheiden sich jedoch deutlich für verschiedene Materialien (BRUDI et al. 1999; SCHRÖDER 1998). Die Reduktion der Bruchlast von Polypropylen-Seilen beruht offenbar vor allem auf der UV-Einstrahlung und kann durch Beschattung deutlich reduziert werden; die Abnahme ist zu Beginn der Bewitterung besonders stark ausgeprägt, verläuft danach aber nicht weiter linear abnehmend (BALL & KONDA 2000).

Zu den tatsächlich in Kronensicherungen auftretenden Lasten gibt es kaum nachvollziehbare Messwerte aus der Praxis. Die einzigen in der Fachliteratur gut dokumentierten Angaben wurden über einen Zeitraum von einem Jahr in zwei Großbäumen gemessen und beziehen sich auf Stahlseile (JAMES 2002). Bei Windgeschwindigkeiten bis zu 45 km/h traten in einer horizontalen Bruchsicherung maximal rund 4,4 kN auf, in der Trag-/Haltesicherung eines ausladenden Astes lediglich 2,2 kN. In der horizontalen Sicherung wurden ruckartige Lastspitzen beobachtet, die aber nicht im unmittelbaren Zusammenhang mit der Einwirkung von Windböen standen. Andere Quellen berichten anekdotisch von viel höheren Einzelmessungen von Rucklasten, die bis zu 50 kN erreichten (W. MOLI-TOR, zitiert bei SCHRÖDER 2002a), und dem zweifachen Versagen von textilen Verbindungen mit fast 50 kN Bruchlast ohne Bruch der Stämmlinge, das erst durch Einbau eines Produktes mit 12 t Bruchlast abgestellt werden konnte (SCHRÖDER 2004).

Gerade diese Beobachtung legt nahe, dass die biomechanische Wirkungsweise von Kronensicherungen und das dynamische Verhalten von Baumkronen nicht immer leicht nachvollziehbar sind. So gehen manche Autoren davon aus, dass die Kronensicherung eine Tragkraft aufweisen sollte, die der Bruchfestigkeit eines Holzzylinders mit dem Durchmesser des zu sichernden Astes entspricht (BETHGE et al. 1994). Da die Autoren zudem überhöhte Werte für die Belastbarkeit des grünen Holzes ansetzen (hierzu kritisch SPATZ 2003), errechnen sich auf diese Weise enorme Anforderungen an die Dimensionierung der Sicherungssysteme. Dies bringt es mit sich, dass extrem starre Sicherungen eingebaut werden und sich so der Bewegungsspielraum für die Kronenteile massiv verringert.

Dies mag seine Berechtigung in dem Moment haben, wo die Kronenteile ruhig gestellt und Bewegungen weitestgehend unterbunden werden sollen – also bei der statischen Sicherung beispielsweise eines gerissenen Zwiesels. Dieser kann auch tatsächlich seine Tragfähigkeit weitgehend eingebüßt haben. Bei Trag-/Haltesicherungen oder zusätzlichen Verankerungen an der Basis stark geschädigter Zwiesel (sog. „Basis-sicherung“ nach SINN 2009a) sind solche Eigenschaften ebenfalls zielführend. Im Falle der dynamischen Bruchsicherung würden starre Sicherungen aber jegliche Eigenleistung des Baumes unterbinden, dessen Kronenteile ja in diesem Anwendungsfall noch über eine maßgebliche eigene Tragfähigkeit verfügen. Damit sie dieses Potenzial ausschöpfen können, müssen sich Stämmlinge und Äste aber verbiegen, da sie nur auf diese Weise entsprechende Gegenkräfte aufbauen und der Belastung entgegenwirken können (GORDON 1984).

2.5 Biomechanische Rahmenbedingungen

2.5.1 Elastische Verformung und Rückstellkraft

Holz ist ein elastisches Material, das sich unter der Einwirkung von Belastungen durch Dehnung und Stauchung der Fasern verformt. Wenn sich die Randfasern auf einer Seite verkürzen und auf der anderen Seite dehnen, ändert sich die Krümmung des Holzkörpers und er biegt sich in eine Richtung. Auf diese Weise speichert ein Ast oder Stämmling sog. Feder- oder Spannenergie, so dass er nach dem Ende der Krafteinwirkung in seine ursprüngliche Form und Position zurückkehren kann. Jede Änderung der Bewegungsrichtung erfordert eine Kraft – wenn die äußere Einwirkung, z. B. durch eine Windböe, nachlässt und ein Kronenteil wieder zurückschwingt, wird das durch die gespeicherte Spannenergie und die sog. Rückstellkraft ermöglicht.

Diese triviale Betrachtung ist Voraussetzung für das Verständnis der modernen, flexiblen Sicherungssysteme. Je größer die einwirkende Kraft, desto stärker wird ein Ast oder Stämmling gekrümmt und umso weiter entfernt er sich von seiner ursprünglichen Position in der Krone. Zugleich wird die sog. Rückstellkraft, also die aus der gespeicherten Spannenergie gespeiste innere

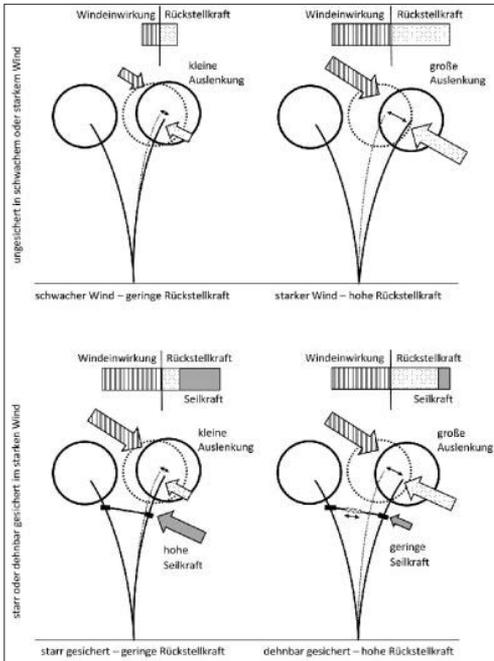


Abbildung 2: Rückstellkraft und Seildehnung

Kraft, die den Holzkörper wieder in seine ursprüngliche Ausgangsposition zurückbringen möchte, immer größer. Die Rückstellkraft ist der Bewegungsrichtung des Kronenteils entgegengerichtet. Sie wirkt also im Idealfall in die gleiche Richtung wie die Kronensicherung und kann diese folglich erheblich entlasten. Dies gilt gleichermaßen für direkte Auslenkung durch den Wind wie indirekte, durch das windinduzierte Schwingen der Kronenteile hervorgerufene Bewegungen (Abbildung 2).

Eine optimale Kronensicherung würde also erst dann greifen, wenn die verbliebene Tragfähigkeit des zu sichernden Baumteils vollständig ausgereizt ist – das ist natürlich praktisch nicht realisierbar. Nach ingenieurtechnischem Verständnis wäre dieser Punkt nicht der endgültige Bruch, sondern das Erreichen der sog. Proportionalitätsgrenze des grünen Holzes (WESSOLLY & ERB 2014). Ab diesem sog. Primärversagen wird der Holzkörper dauerhaft verformt, weil Fasern auf der Druckseite seitlich ausknicken und nach und nach das Bruchversagen einsetzt (DETTNER et al. 2015). Die Proportionalitätsgrenze wird in der Regel bei 50 bis 55 % der endgültigen Bruchlast erreicht (SPATZ &

PFISTERER 2013). Danach beginnt der sog. plastische Bereich des Bruchversagens, in dem der Holzkörper nochmal sehr viel Energie aufnimmt, die aber nicht in Form von Spannenergie gespeichert, sondern beim progressiven Versagen verbraucht wird.

Durch eine zu geringe Flexibilität der Kronensicherung – meist die Folge von hoch dimensionierten Seilen – wird die einwirkende Windbelastung quasi ungefiltert auf das Seil und den zweiten Ankerpunkt übertragen. Die Schwingungsbreite, die der Durchhang des Seiles zulässt, ist erstaunlich klein, meist im Bereich weniger Zentimeter. Da die eigene Rückstellkraft des zu sichernden Kronenteils aber proportional, also 1:1 mit zunehmender Auslenkung ansteigt, ist die Eigenleistung des Baumes noch sehr gering, bis sich das Seil strafft. Auf diese Weise kann also eine zu starke Dimensionierung der Verbindung zu höheren Lastspitzen führen, die Seile versagen lassen, ohne dass die Stämme brechen – diese waren ja nicht ansatzweise an der Aufnahme der Energie des Windes beteiligt.

2.5.2 Dynamische Effekte

Zu starre Seile können aber auch die Belastung des Ankerpunktes durch dynamische Effekte maßgeblich erhöhen. Beschrieben wurde dies als Karate-Effekt (WESSOLLY & VETTER 1995) und an anderer Stelle mit dem Schlag eines Holzstabes auf eine Tischkante verglichen (MATTHECK zitiert in SCHRÖDER 2002b). Das Schwingungsverhalten von Bäumen und Baumkronen wurde bis heute vielfach untersucht (JAMES et al. 2014). Dabei hat sich gezeigt, dass belaubte Kronenteile aufgrund der starken aerodynamischen Dämpfung eher langsam und gleichmäßig schwingen (CAMPIFORMIO 2012; LEE & JIM 2018). Im unbelaubten Zustand zeigen Kronenteile zwar deutlich schnellere Bewegungen (SCHINDLER et al. 2013), diese sind aber immer noch viel geringer als die Geschwindigkeiten, an die die Bilder des Karateschlags oder des Bruchs an der Tischkante erinnern.

Die ruckartige Krafteinwirkung, wenn sich ein starres Seil strafft, stoppt jedoch die Bewegung des gesicherten Kronenteils, auch wenn diese relativ langsam war, ebenso abrupt innerhalb von Sekundenbruchteilen. Dadurch kommt es zu einer Konzentration der Belas-

tungen im Anschlagpunkt, der insbesondere bei den älteren invasiven Kronenverankerungen ohnehin häufig durch Fäulnis im Holzkörper geschwächt wurde. Die biomechanischen Vorgänge bei diesem Versagen wurden bislang kaum beschrieben. Sturzmessungen in Seilgärten haben aber gezeigt, dass die Faserdehnungen im Bereich der Anschlagstelle bei ruckartigen Belastungen am größten sind (WENGER & WITTMANN 2009). Die Bäume sind offenbar nicht in der Lage, plötzlich einwirkende Kräfte rasch genug in eine Verformung über ihre gesamte Länge umzusetzen, wie es bei langsameren, quasi-statischen Belastungsgängen der Fall wäre, wodurch an der Befestigung stark erhöhte Faserverformungen auftreten.

Die Bruchgefahr am Ankerpunkt bei starren Kronensicherungen enthält Elemente, die sich am besten durch eine Betrachtung der Energieübertragung beschreiben lassen. Die Bäume nehmen im Sturm die Energie des Windes auf und wandeln sie durch die Auslenkung der Kronenteile in Spannenergie um. Die Kronenteile oberhalb der Befestigung können nach dem Greifen der Sicherung die weiterhin einwirkende Energie des Windes und die Kraftspitze aus der starren Sicherung nicht rasch genug in die anderen tragenden Teile des Baumes weitergeben, die sich nun zudem viel starrer verhalten. Dadurch erhöht sich im Gegenzug die Verformung der tragenden Teile über der Sicherungsebene. An der Anschlagstelle müssen ab diesem Zeitpunkt zudem noch erhöhte Schubkräfte und Biegemomente abgetragen werden: Nachdem die Kronensicherung greift, behalten die oberen Kronenteile zunächst ihre Geschwindigkeit bei, während der untere Stamm an der Befestigung gestoppt wird. Dies verursacht zusätzliche Belastungen an der Anschlagstelle und erheblich größere Verformungen als zuvor, bis im Extremfall die Fasern überlastet werden und der Bruch einsetzt.

Je nachgiebiger die Kronensicherung ist, desto weicher ist der Lastübergang zwischen den Kronenteilen und die plötzliche Konzentration der Randfaserdehnungen auf den Anschlagpunkt wird vermieden. Weiche, nachgiebige Systeme werden in vielen Bereichen eingesetzt, um harte Lastspitzen abzufedern – so z. B. beim Bungee-Jumping, bei Abschleppseilen oder bei Sprungmatten. Die Gefahr des Bruchs an der Anschlagstelle ist umso größer, je starrer und steifer die Verbindungen im Vergleich zur natürlichen Krone reagieren.

2.5.3 Einfluss der Sicherung auf die Kronendynamik

Nachgiebige Kronensicherungen greifen nach wissenschaftlichen Erkenntnissen nicht maßgeblich in die Dynamik des Baumes ein, denn am Stamm gemessene Eigenfrequenzen und Dämpfungsbeiwerte wurden durch den Einbau einer dynamischen Verbindung nicht verändert (RUST et al. 2013; KANE 2018). Lediglich bei unbelaubter Krone wurden im Vergleich von jeweils fünf Bäumen mit und ohne Kronensicherung eine erhöhte Eigenfrequenz und eine geringere Dämpfung nachgewiesen (REILAND et al. 2015). Dieser Effekt war im belaubten Zustand an den gleichen Bäumen nicht mehr signifikant messbar, vermutlich spielte er infolge der großen dämpfenden Wirkung der Belaubung keine maßgebliche Rolle mehr. Dann sind aber die Einwirkungen durch den böigen Wind aufgrund des höheren Windwiderstandes der belaubten Krone besonders stark (BAKER 1997; DELLWIK et al. 2019). Die Übertragung von Kräften innerhalb der Krone mit Hilfe nachgiebiger Systeme begrenzt demnach zwar die Auslenkung der Kronenteile im Sturm, hat aber auf die maximale Einwirkung des Windes keinen Einfluss. Die Stand- und Bruchsicherheit eines Baumes könnte demnach durch eine Kronensicherung nur im Winterzustand erhöht werden (WESSOLLY 2014).

Das Aufschwingen der Stämmlinge im Wind, das zu einer Verstärkung der auftretenden Belastung durch Resonanz führen könnte, ist gerade für belaubte, tief bestete Bäume jedoch sehr unwahrscheinlich (JAMES 2010; HOFFMANN & RUST 2018; SCHINDLER & MOHR 2019). Übertragen auf die Kronensicherung bedeutet dies, dass zwar durchaus gegenläufige Bewegungen von Stämmlingen zu erwarten sind, ein dynamisches Aufschwingen im böigen Wind durch zu großen Bewegungsspielraum aber nicht befürchtet werden muss. Vielmehr wäre es positiv, das natürliche Verhalten des Baumes im Wind nicht zu unterbinden, um die Rückstellkraft des Holzkörpers so weit als möglich auszuschöpfen.

Grundsätzlich gibt es aber selbstverständlich auch Situationen, die entgegen der vorigen Ausführungen eine hohe Auslegung der Bruchlasten und eine begrenzte Dehnbarkeit erfordern. Solche Anforderungen ergeben sich aus dem Sicherungsziel, der Größe und

dem Gewicht der zu sichernden Teile, der Form und Struktur der Krone sowie der technisch sinnvollen Anordnung der Sicherung. Daher sind in vielen Fällen Einzelbetrachtungen bei der Ausschreibung von Kronensicherungen unvermeidbar. Hierzu folgen, basierend auf dem zuvor Gesagten, einige Anhaltspunkte und Hinweise.

3 Ausschreibung und Einbau von Kronensicherungen

Zahlreiche Anforderungen an die verwendeten Baustoffe und die fachgerechte Ausführung von Kronensicherungen sind in der ZTV-Baumpflegerie bereits definiert. Diese sind in Ausschreibungen automatisch Vertragsbestandteil, wenn die ZTV vereinbart wurde. Dennoch sind genaue Spezifikationen gem. Kap. 0 der ZTV-Baumpflegerie erforderlich, um die Leistung eindeutig zu beschreiben. Insbesondere, wenn von den einfachen Regelfällen abgewichen wird, müssen dazu eventuell auch gesonderte Überlegungen angestellt werden, wie die Kronensicherung beschaffen sein und eingebaut werden soll, um das Sicherungsziel zu erfüllen.

Gemäß Tabelle 1 können die technischen Eigenschaften einer Kronensicherung auf vier Ebenen im Detail beschrieben werden. Dabei enthalten Kap. 2 und 3 der ZTV-Baumpflegerie bereits exakte Anforderungen auf allen Ebenen. Zu manchen Merkmalen liefert die ZTV jedoch nur Richtlinien in Kap. 0 oder Empfehlungen für Standardlösungen im Anhang. Daher sind nachfolgende Hinweise zur Ausschreibung nach den vier Ebenen gegliedert. Lediglich die weitergehenden Anleitungen zur Bemessung der Bruchlast und Festlegung der Dehnbarkeit der Verbindungen sind in einem gesonderten Kapitel enthalten.

3.1 Verwendung

In der Regel wird eine Kronensicherung als dauerhafter Einbau angelegt. Falls die Sicherung voraussichtlich nur für eine begrenzte Zeit erforderlich ist, sollte dies in der Dokumentation ebenso angegeben werden wie der Einbauzeitpunkt, das Sicherungsziel sowie verwendete Stoffe, Bauteile und Bruchlasten der Verbindungen. Für die Ausschreibung ergibt sich auf dieser

Ebene kein besonderer Detaillierungsbedarf. Als Erläuterung und grundlegende Anleitung der Arbeiten ist die Angabe des Sicherungsziels jedoch unverzichtbar, denn alle weiteren Spezifikationen ergeben sich im Grunde aus dieser Festlegung.

3.2 Anordnung

Um eine komplexe Krone ausreichend zu sichern, müssen oft mehrere Verbindungen zu einer Kronensicherung zusammengefügt werden. Deren genaue Anordnung kann vielfach im Rahmen einer regulären Baumkontrolle oder einer Baumuntersuchung gar nicht vollständig festgelegt werden, weil der Aufbau der Krone nicht hinreichend genau erfasst und bildlich dargestellt werden kann. In solchen Fällen ist es unvermeidbar, sich bei der Ausschreibung auf grundlegende Festlegungen zu beschränken und die exakte Art der Ausführung den Baumpflegeren zu überlassen. Hier unterscheiden sich die Möglichkeiten einer eindeutigen Leistungsbeschreibung in unserem Fachbereich deutlich von Arbeiten an genormten künstlichen Bauteilen. Die grundlegenden Gesichtspunkte der Anordnung werden nachfolgend kurz behandelt.

3.2.1 Verbundart

Die neue ZTV-Baumpflegerie unterscheidet zwischen Einfach-Verbindung und Dreiecks-Verbindung, wobei letztere zu einem Verbund aus mehreren Dreiecken ergänzt werden kann. Im Grunde sind auch andere Verbundarten möglich und können in bestimmten Anwendungsbereichen sinnvoll sein. Die Grundform des Dreiecks sollte aber der wesentliche Baustein auch komplexerer Anordnungen bleiben.

Insbesondere, wenn ausladende Starkäste nach oben rückverankert werden sollen, muss hierfür immer eine ausreichend belastbare oder stabil gesicherte Grundstruktur vorhanden sein. Ansonsten kann es zum Bruch von gesichertem und sicherndem Ast zugleich mit erheblichen Folgeschäden für den Baum kommen (Abbildung 3). In solchen Fällen kann ein als Haupttragwerk eingebautes Dreieck dazu dienen, auch andere Teile der Krone in die Lastabtragung einzubeziehen und entstehende Kräfte zu verteilen.



Abbildung 3: Einbaufehler: Bruch von sicherndem und gesichertem Ast

Innerhalb des Verbundes dürfen die Verbindungen weder untereinander noch mit Kronenteilen scheuern. Die Festigkeitsverluste, die hieraus resultieren, sind vom verwendeten Material abhängig und haben in Einzelfällen bei Polypropylen bis zu einem Drittel der Bruchlast erreicht (BRUDI et al. 1999). Gegebenenfalls können Schäden am Material durch den vorbeugenden Einsatz eines speziellen Schutzschlauches vermieden werden, der auch am freien Seil angebracht werden kann (Abbildung 4).

3.2.2 Einbauhöhe

Da sich auch die Einbauhöhe nach den konkreten Gegebenheiten in der Krone richten muss, wären exakte Angaben in einer Leistungsbeschreibung nicht möglich. Um kalkulieren zu können, reichen jedoch Höhenklassen oder der Bezug zur Baumhöhe aus. Sind Abweichungen von der generellen Empfehlung gefordert, die Sicherungsebene mindestens auf $\frac{2}{3}$ der Länge des zu sichernden Kronenteils zu platzieren, muss dies

in der Ausschreibung angegeben werden. Gleiches gilt, wenn eine zweite Sicherungsebene vorgesehen ist. Hier macht die ZTV keine Vorgaben zur Einbauhöhe, sondern liefert Beispiele in Kap. 0. In der Praxis findet der Einbau teils unmittelbar an der Verzweigungsstelle als sog. „Basissicherung“ statt (SINN 2009a), aber ebenso auch weiter oben als ergänzende statische oder dynamische Sicherungsebene. Hier sind jeweils andere Anforderungen an die Beschaffenheit der Verbindung zu stellen, so dass die Ausschreibung dies berücksichtigen muss.

Bei der Basissicherung kommen eventuell zusätzliche Elemente wie Schäkel oder Wantenspanner zum Einsatz (PIETRUSCHINSKI 2014), die nicht als Komponenten der verschiedenen Bauarten in der ZTV-Baumpflege genannt werden und deshalb gesondert auszuschreiben sind. Werden mehrere Ebenen kombiniert, ist eine Abstimmung der Dehnbarkeit und Bruchlast zwischen den Ebenen oft schwierig. In jedem Fall wäre zu prüfen, ob eine zweite Ebene die ihr zugeordnete Funktion wirklich erfüllen kann. Bei nachgiebigen Verbindungen ist



Abbildung 4: Schutzschlauch auf freier Strecke

dies wahrscheinlicher als bei statischen, weil erstere die auftretenden Lasten grundsätzlich besser untereinander verteilen können. Bei statischen Verbindungen besteht immer die Gefahr, dass die Last vor allem von einer Ebene übernommen wird und die zweite wirkungslos bleibt, solange die erste Ebene nicht versagt.

3.2.3 Ausrichtung

Für Bruchsicherungen ist die mehr oder weniger horizontale Ausrichtung der Regelfall. Ein geneigter Verlauf der Verbindung ist in vielen Fällen aber eine sinnvolle Steuerungsmöglichkeit, um Belastungen günstiger in der Krone zu verteilen. Die Anordnung senkrecht zur Winkelhalbierenden, die in internationalen Regelwerken gefordert wird (SMILEY & LILLY 2007), ist nicht immer optimal. Soll ein schwächeres Kronenteil gesichert werden, ist es oft günstiger, den schwachen Ast möglichst im rechten Winkel anzuschlagen und das Seil dafür leicht schräg zum stärkeren Ast zu

führen. Dadurch lassen sich die Seilangriffswinkel besser ausnutzen, während die Seilkraft bis etwa 30° Neigung nicht wesentlich ansteigt (WESSOLLY & ERB 2014). In komplexen Seilverbänden kann durch die Morphologie der Krone sogar eine sattel- oder dachförmige Ausrichtung der Verbindungen entstehen.

Auch wenn es angezeigt ist, den sichernden Stämmeling zu entlasten, kann durch schräge Seilführung der Hebelarm verkürzt und so die Tragfähigkeit des Ankerpunktes effizient genutzt werden. Das ist aber nur begrenzt möglich, ohne die Funktion der Kronensicherung zu gefährden, weil der seitliche Bewegungsspielraum des gesicherten Kronenteils bei sehr steil nach oben angreifender Seilführung erheblich zunimmt. Dadurch hat ein nachgiebiges Sicherungsseil eventuell keine ausreichende Möglichkeit mehr, seine Haltekräfte zu entfalten (vgl. „Münchhausen-Effekt“ bei WESSOLLY & VETTER 1998). Im Extremfall wäre die Sicherung nicht mehr wirksam, so dass es trotz Einbau einer Kronensicherung zum Bruchversagen kommt (Abbildung 5).

3.3 Verbindung

Hinsichtlich der Verbindungen ist eine große Vielfalt von Produkten am Markt erhältlich. Unterschiedliche Hersteller bieten Seile oder Gurtbänder mit gestaffelten Bruchlasten und Dehnbarkeiten aus verschiedenen Kunststoffen an. Daher sind in der Regel grundsätzliche Festlegungen zwar unabdingbar, um vergleichbare Angebote zu erhalten, gleichzeitig setzt die erforderliche Produktneutralität öffentlicher Ausschreibungen den Spezifikationen aber auch enge Grenzen.

So ist es in der Regel nicht sinnvoll, die zu verwendenden Kunststoffe festzulegen, wohl aber deren wesentliche Eigenschaften zu definieren, wie z. B. Zeitstandsfestigkeit, Dehnbarkeit und Bruchlast. Demgegenüber sollten die Art der Lastübertragung (Ein- oder Mehrkomponentensysteme), die Ausführung als Hohltau oder Gurtband sowie die zu verwendenden Komponenten nur in begründeten Fällen beschrieben und festgelegt werden. Für die Leistungsbeschreibung reicht in der Regel der Verweis auf die Ausführung nach Angaben des jeweiligen Herstellers aus.

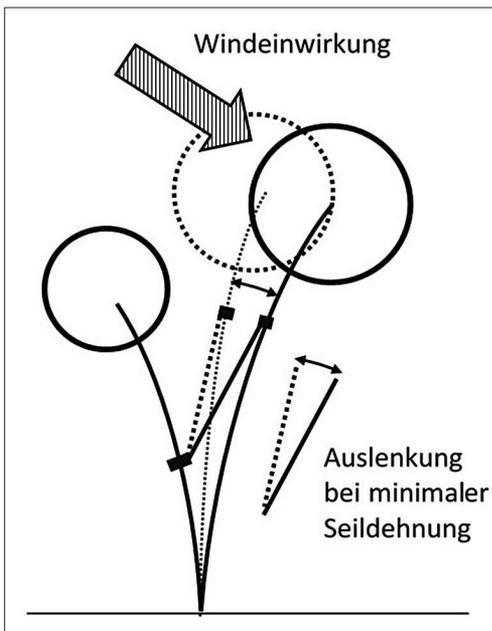


Abbildung 5: Zu schräge Seilführung

3.3.1 Durchhang

Der Durchhang des Seiles ist bei dynamischen Verbindungen wichtig, um eine Kontrolle des Systems vom Boden aus zu ermöglichen. Hat sich der Durchhang nach einem Sturm deutlich vergrößert, deutet dies auf eine starke Belastung dieser Verbindung hin (WESSOLLY 2006). Fehlt der zuvor vorhandene Durchhang, könnte die Sicherung z. B. durch Rissbildung oder primären Bruch eines Kronenteils unter Dauerlast stehen. Allerdings straffen sich Verbindungen auch durch starken Zuwachs an der Befestigungsstelle (THOMSEN 2003). Einige Polyamide können unter Bewitterung erheblich schrumpfen, wodurch sich das Seil straff ziehen und an Festigkeit verlieren kann (SCHRÖDER 1998). Daher ist die Dokumentation des verwendeten Materials für den Kontrolleur unverzichtbar.

Grundsätzlich sollen dynamische Bruchsicherungen auch im Sommer leicht durchhängend eingebaut werden. Die Obergrenze zieht die ZTV-Baumpflege jetzt bei einem Durchhang von 10 % der Länge der Verbindung. Diese Angabe schließt offenbar auch den unbelaubten Zustand ein, in dem der Durchhang sich in vielen Fällen etwas vergrößern kann.

Den Durchhang in Prozent abzuschätzen, fällt in der Praxis meist schwer. Praktikabel und gut vom Boden aus erkennbar ist ein Durchhang ab etwa 5 %, also z. B. 20 cm auf 4 m Spannweite. Wird der Durchhang mit zunehmender Spannweite gleichmäßig erhöht, d. h. bei 6 m Spannweite auf 30 cm, bei 8 m auf 40 cm usw., bleibt der prozentuale Durchhang gleich. In diesem Fall lässt sich der dadurch entstehende Spielraum, ab dem die Verbindung gestrafft ist und greift, mit einer Formel berechnen (DETER et al. 2004). Dieser Spielraum ist bei 5 % Durchhang jedoch erstaunlich gering, er beträgt dann nur 0,67 % der Spannweite, also auf 6 m Länge lediglich 4 cm. Mit 10 % Durchhang werden demgegenüber bereits über 2,6 % Spielraum erreicht. In unserem Beispiel wären das auf 6 m Länge etwa 16 cm, die Verbindung hängt dann aber auch um ganze 60 cm durch.

Statische Systeme sollten im Sommer handfest, jedoch ohne Spannung eingebaut werden, da durch das unmittelbare Ansprechen der Sicherung Lastspitzen minimiert werden können. Bei Einbau im Winter sollte

die Verbindung nur soweit durchhängen, dass im Sommer keine hohen Dauerlasten auftreten. Da hier also die Kontrolle vom Boden aus nicht in gleicher Weise möglich ist, sind spezielle Indikatoren für eine Überlastung der Sicherung (Kennfäden, Signalschlaufen) bei statischen Verbindungen von besonderem Interesse.

3.3.2 Dehnbarkeit

Während die ZTV-Baumpfleger für die Dehnbarkeit der sog. dynamischen Verbindungen keine Vorgaben enthält, soll sie bei statischen Seilen laut informativem Anhang weniger als 5 % betragen. Dieser Wert wurde in Anlehnung an DIN EN 1891 gewählt, dort gilt er jedoch für eine festgelegte Belastung der Seile. Eine solche Angabe fehlt aber in der ZTV-Baumpfleger, so dass in der Ausschreibung gegebenenfalls definiert werden sollte, auf welche Kraft sich diese Maximaldehnung bezieht. Es ist keinesfalls selbstverständlich, dass hier die Bruchdehnung gemeint ist. Diese Anforderung würde nur von Stahl- und Dyneemaseilen erfüllt. Bei der statischen Sicherung sollen die Bruchlasten der Tabelle im Anhang der ZTV-Baumpfleger ohnehin verdoppelt werden. In dieser Hinsicht könnten auch andere Produkte eingesetzt werden, die beispielsweise bei der Hälfte der angegebenen Bruchlast weniger als 5 % Dehnung erreichen. Allerdings nimmt man dabei in Kauf, dass die Kronenteile nicht immer vollständig ruhigestellt werden können.

Die Dehnbarkeit der Verbindungen sollte stets auf die Verwendung und die individuellen Verhältnisse in der Krone abgestimmt werden. Federelemente sind dann zielführend, wenn z. B. bei kurzen Spannweiten sowie im Bereich niedriger Belastungen ausreichend Spielraum für die Bewegung der Kronenteile gewährleistet werden muss (WESSOLLY 2009). Sie sollten in jedem Fall speziell ausgeschrieben werden, da ihre ruckdämpfenden und flexiblen Eigenschaften nicht immer in gleicher Weise durch Seildehnung oder Durchhang gewährleistet werden können. Da gewendelte Gurtbänder diese Funktion ebenfalls nur über eine gewisse Länge erzielen (SINN 2002) und sie zudem nach einer starken Belastung einbüßen (SINN 2009b), sind sie nicht vollkommen gleichwertig mit Produkten, die über längenunabhängige Federelemente verfügen.

3.3.3 Bruchlast und Zeitstandsfestigkeit

In Tabelle 4 des Anhangs B empfiehlt die ZTV-Baumpfleger eine Systembruchlast für dynamische Verbindungen gemäß des Durchmessers an der Basis der zu sichernden Teile. Die Werte wurden von WESSOLLY (2007) mit empirischen Daten über drei Rechenwege abgesichert. Dennoch sind in vielen Fällen Abweichungen von diesen Richtwerten sinnvoll, allein aufgrund der Tatsache, dass der Durchmesser an der Basis allein keine zuverlässige Einschätzung der Kronenstruktur ermöglicht. Diese ist aber ausschlaggebend für eine sinnvolle Dimensionierung der Kronensicherung.

In der Neufassung der ZTV-Baumpfleger wird klar gestellt, dass die Hersteller nicht nur die Bruchlast, sondern die gesamte Funktionsfähigkeit der Sicherung über einen Zeitraum von acht Jahren gewährleisten müssen. Die Eigenschaften dürfen sich nicht so verändern, dass das Sicherungsziel gefährdet wird. Dazu kann man neben einer kritischen Abnahme der Bruchlast auch eine maßgebliche Veränderung der Nachgiebigkeit zählen, wenn ausreichende Flexibilität gewährleistet bleiben muss. Hierzu liegen bis dato nur sehr wenige Messergebnisse für einzelne Produkte vor (SCHRÖDER 1998).

In jedem Fall muss gesondert ausgeschrieben werden, wenn die Sicherung auch für die Aufnahme von Dauerlast ausgelegt sein soll. Unter andauernder hoher Last zeigen die meisten Kunststoffseile anders als Stahlseile ein Kriechverhalten, das zu dauerhafter Längenzunahme und Bruchlasteinbußen führt. Nach Auffassung von SINN & SINN (2005) ist dies lediglich bei Gurtsicherungen aus Polyester nicht der Fall. Die Hochleistungsfaser Dyneema, die aus hochmodulären Polyethylenen besteht, kriecht unter Dauerlast zwar ebenfalls etwas, verliert dabei nach Herstellerangaben aber nicht an Festigkeit (mündl. Mitt. D. SECKLEHNER, Teufelberger Ropes 2019). Für solche permanent belasteten Anwendungen werden daher oft Stahlseile als Verbindungselement eingesetzt, wobei dabei auch die Befestigungen aus entsprechend geeigneten Kunststoffen hergestellt sein müssen. In der Regel sind das lediglich Gurtschlaufen aus Polyester oder Dyneema, bei denen wiederum die vom Hersteller anzugebende Zeitstandsfestigkeit unter Dauerlast zu beachten ist.

3.4 Befestigung

3.4.1 Anbindung

In der aktuellen Fassung der ZTV-Baumpflege wird eine ausreichende Druckverteilung an der Befestigung gefordert. Aus fachlicher Sicht sind keine Angaben möglich, welche Breiten für welche Belastung ausreichen, da kaum Untersuchungen zur Druckempfindlichkeit des Kambiums und der Rinde vorliegen (DETTNER et al. 2009). In einer Ausschreibung wäre es dennoch zielführend, hier bestimmte Mindestbreiten festzulegen, beispielsweise 4 oder 5 cm für Bruchlasten bis 4 t, um vergleichbare Angebote zu erhalten. Flexible Schutzschläuche, die über ein umschlingendes Seil gezogen werden, sind zwar optisch eine Verbreiterung, tragen aber nicht in gleicher Weise wie Spreizbänder oder Gurtschlaufen zur Lastverteilung bei. Solange entsprechende Nachweise der Hersteller ausstehen, erscheint diese Form der Befestigung daher zumindest für Verbindungen mit hoher Bruchlast oder Trag-/Haltesicherungen nicht zweckmäßig.

Alle Befestigungen müssen gem. ZTV-Baumpflege nachstellbar sein, um für Dickenwachstum Platz zu schaffen. Bei Schlaufengurten ist dies regelmäßig nur durch den Austausch der gesamten Befestigung möglich. Ausreichend groß gewählte Schlaufen müssen gewährleisten, dass es innerhalb der geplanten Einsatz-

dauer nicht zu Einwachsungen kommen kann. Verringert sich der Abstand zwischen Stamm und Verbindungselement infolge des Dickenwachstums zu sehr, und liegt der Gurt bereits eng an, erhöhen sich im Lastfall die auf die Schlaufen wirkenden Kräfte enorm. Dies muss gegebenenfalls durch eine höhere Bruchlast des Gurts kompensierbar sein, um einen vorzeitigen Austausch aus Sicherheitsgründen zu vermeiden.

Eine neue Regelung findet sich in der ZTV-Baumpflege zur zulässigen Anzahl von Verbindungselementen an einer Befestigungsschlaufe. Hier sind maximal zwei Seile pro Befestigung zulässig, und dies auch nur dann, wenn der Winkel zwischen den beiden weniger als 90° beträgt. Ansonsten könnten durch die Bewegung der Kronenteile im Wind zu starke Rotationsbewegungen in der Schlaufe entstehen, die Scheuerschäden am Baum und Material befürchten lassen (Abbildung 6).

3.4.2 Positionierung

Die Befestigung muss so angebracht werden, dass sie im Lastfall nicht verrutschen kann. Für Bruchsicherungen ist das meist unproblematisch, vor allem wenn Astgabeln zur Verfügung stehen. Muss eine Verbindung auf freier Länge am Stamm angebracht werden, kommen nur Doppelgurte nach Osnabrücker System (SCHRÖDER 1991) in Betracht. Auch in diesem Fall

Abbildung 6:
Zwei Verbindungen an
einer Befestigung



müssen aber die Seilangriffswinkel beachtet werden, um ein Verrutschen ausschließen zu können. Klare Grenzen gibt es aufgrund unterschiedlicher Borkenstruktur und auftretender Reibungskräfte sicherlich nicht. Aus Erfahrungen bei baumstatischen Zugversuchen lässt sich ableiten, dass breite Schlingen bis Seilangriffswinkel von 30° problemlos in Position gehalten werden. Ruckartige Belastungen könnten sich dabei etwas anders auswirken, entsprechende Untersuchungen sind jedoch bislang nicht bekannt.

Eine Trag-/Haltesicherung muss stets so angeschlagen werden, dass die Befestigung am gehaltenen Kronenteil nach einem Bruchversagen nicht hoch- oder gar herausrutschen kann. Baumpfleger müssen die Befestigung im konkreten Einzelfall sicher anbringen – die Ausschreibung kann nur festlegen, dass durch die Positionierung das Herausrutschen nach dem Bruch verhindert werden muss. Das verwendete Material ist dabei weniger ausschlaggebend, da alle umschlingenden Befestigungen bei vertikalen Lasten grundsätzlich rutschgefährdet sind.

Weil bei statischen Verbindungen an der Anschlagstelle große Belastungen im Holzkörper auftreten können, muss darauf geachtet werden, dass sich die Befestigung nicht an einer Schwachstelle oder lokalen Verjüngung des Querschnitts befindet. Direkt über einer Vergabelung gilt aber durchaus noch der Durchmesser unter der Gabel als tragender Querschnitt. Ein ausgehöhlter Bereich jedoch (z. B. mit großer Spechthöhle) oder ein durch Fäule vorgeschädigter Holzkörper sind zunächst als Ankerpunkt ungünstig. Ist die Anbringung dort unvermeidbar, sollte die Dimensionierung der Verbindung auf die lokal verminderte Tragfähigkeit des Anschlagpunktes abgestimmt werden, z.B. indem ihre Dehnbarkeit durch Federelemente erhöht und die Bruchlast vermindert wird. Denn eine ausreichende Tragfähigkeit der Ankerpunkte muss gewährleistet sein, und es entstehen enorme Missverhältnisse, wenn 4 t Sicherungen an Stämmlingen mit nur 20 cm Durchmesser angeschlagen werden. Im Grunde zeigen auch die nachfolgenden Überlegungen zur individuellen Abstimmung der Sicherung auf die Baumkrone, dass der Durchmesser an der Befestigung ein zuverlässigerer Anhaltspunkt für die Dimensionierung der Verbindungen wäre als der Durchmesser an der Basis.

4 Grundlagen der Dimensionierung

4.1 Bemessung der Bruchlast

Ausschlaggebend für die Dimensionierung der Bruchlast von Bruchsicherungen sollten die Kronenstruktur und das dynamische Verhalten der zu sichernden Kronenteile sein. Dies ist in der Praxis nicht ohne Weiteres zu beurteilen, weil nur wenige einfache Anhaltspunkte für die Abschätzung winderregter Schwingungen in Baumkronen bekannt sind. Im Standardfall sind die Hinweise der ZTV-Baumpfleger zielführend, um die Einbauhöhe und eine ausreichende Bruchlast festzulegen. Allerdings ist nach bisheriger Kenntnis nicht zu erwarten, dass in dehnbaren Kronensicherungen Lastspitzen im Bereich von mehreren Tonnen auftreten, weshalb die angegebenen Werte als tendenziell zu hoch angesehen werden können. Der Nebeneffekt so hoher Bruchlasten ist jedoch eine geringere Dehnbarkeit der Verbindungen, die zu den genannten unerwünschten Beeinträchtigungen führen kann (vgl. hierzu auch ZTV-Baumpfleger, Anhang B 4). Gerade bei geringen Windeinwirkungen verhalten sich viele Sicherungen mit hoher Bruchlast weitgehend wie ein statisches System (SINN 2009b).

Andererseits ist es nicht immer möglich, die Kronensicherungen in der optimalen Höhe gem. ZTV-Baumpfleger anzubringen. Bei zu geringer Einbauhöhe müssen die Bruchlasten hoch genug gewählt werden, um den kürzeren Hebelarmen, aber auch den geringen Dehnungswegen im unteren Kronenbereich Rechnung zu tragen. Will man die Eigenschaften einer Kronensicherung an das dynamische Schwingungsverhalten der Krone anpassen, sind Abweichungen von den Empfehlungen der ZTV-Baumpfleger zur Dimensionierung oft sinnvoll und zielführend. Dabei spielen vor allem biomechanische Einflussfaktoren eine entscheidende Rolle. Die Bruchlast sollte umso **höher** gewählt werden,

- je höher die Windbelastung oder das Gewicht der gesicherten Kronenteile sind,
- je kürzer der wirksame Hebelarm der Sicherung ist,
- je schwächer die dämpfenden Eigenschaften der gesicherten Kronenteile (Verzweigungsstruktur, Masseverteilung, Belaubung) ausgeprägt sind oder
- je weniger nachgiebig die verwendete Verbindung ist.

Die genannten Randbedingungen treffen entweder auf stark vorgeschädigte und eventuell bereits eingekürzte Kronen zu, oder aber auf besonders exponiert stehende Bäume mit großer Kronenausdehnung. Beispiele für Kronenstrukturen mit schwacher Dämpfung wären stark eingekürzte Bäume oder typische Waldbäume mit sehr hoch ansetzenden kleinen Kronen. Auch für statische Verbindungen sollten höhere Bruchlasten gewählt werden.

Demgegenüber kann die Bruchlast **geringer** gewählt werden,

- je niedriger die Belastbarkeit der Anbindungspunkte ist,
- je weniger die Tragfähigkeit durch den Schaden vermindert wurde oder
- je größer die Auslenkung des gesicherten Stämm- lings unter Last ist.

Während für eine Abschätzung der Belastbarkeit von Ankerpunkten durchaus Richtwerte vorliegen (z. B. DETTER et al. 2008; DETTER 2017) und die Abnahme der Tragfähigkeit durch Schäden am Holzkörper vielfach diskutiert wurde (DAHLE et al. 2017), ist gerade der letzte Punkt in der Praxis nur schwer erfassbar. Er lässt sich oft aber durch ausreichende Erfahrung oder über das von Kletterern im Baum spürbare Schwingungsverhalten zuverlässig einschätzen (BUSEMANN 2013). Demnach sind bei schlanken und dünnen Stämm- lingen generell weniger belastbare und somit nachgiebigere Verbindungen sinnvoll, da ansonsten die Auslenkung des Kronenteils, die zum Aufbau der Rückstellkraft erforderlich ist, unnötig stark eingeschränkt würde.

Generell nimmt die Durchbiegung f eines zylindrischen Holzkörpers mit seinem Durchmesser d ab und mit der 3. Potenz seiner Schlankheit zu, also dem Verhältnis von Einbauhöhe l und Durchmesser d .

$$f = \frac{64 \times F \times l^3}{3 \times E \times \pi \times d^4}$$

$$f \sim \left(\frac{l}{d}\right)^3 / d$$

Dies bedeutet, dass ein Stämm- ling den 8-fachen Dehnungsweg erfährt, wenn die gleiche Kraft in doppelter Anbindungshöhe einwirkt (doppelte Schlankheit bei

gleichem Durchmesser). Dieser Effekt verstärkt sich zusätzlich, wenn man abholzige Stämm- linge betrachtet. Vergleicht man zwei Stämm- linge, deren Anbin- dung sich in gleicher Höhe befindet, von denen einer aber nur einen halb so großen Durchmesser aufweist, errechnet sich für den dünneren Stämm- ling sogar die 16-fache Auslenkung (doppelte Schlankheit und halber Durchmesser).

4.2 Festlegung der Dehnbarkeit der Verbindungen

Höhere Bruchlasten sind bei den verwendeten Kunst- stoffen mit einer geringeren Dehnbarkeit des Seiles verbunden. Daher sollten weniger belastbare Seile ver- wendet werden, wenn das dynamische Verhalten des Baumes nicht eingeschränkt werden soll (vgl. ZTV- Baumpflege Anhang B 4). Im Umkehrschluss muss eine umso starrere Verbindung gewählt werden, je weniger nachgiebig die zu sichernden Kronenteile sind. Ein gutes Maß für die Nachgiebigkeit von Ästen und Stämm- lingen ist i. d. R. ihr Durchmesser an der Anbin- dungsstelle. Muss die Sicherung aufgrund der Kronenstruktur (z. B. bei Ständerbildung) im Bereich großer Durchmesser erfolgen, wäre eine dehnbare Ver- bindung kaum in der Lage, den Bruch zu verhindern. Demgegenüber können starre Seile auch bei geringer Auslenkung der Stämm- linge bereits hohe Kräfte auf- nehmen. Hierfür kommen zumindest bei größeren Spannweiten nur Stahlseile oder spezielle Kunststoffe (z. B. Dyneema), die kaum Eigendehnung aufweisen, infrage. In diesem Fall können aber hohe Lastspitzen durch schockartige Belastungen auftreten.

Folgende Parameter sollten bei der Wahl der Dehnbar- keit einer dynamischen Bruchsicherung berücksich- tigt werden. Das System soll umso nachgiebiger sein,

- je geringer der Durchmesser an der Befestigung ist,
- je höher die Sicherungsseile angeschlagen werden können,
- je schwingungswilliger die gesicherten Kronenteile sind,
- je größer der zum Versagen der Schwachstelle erfor- derliche Dehnungsweg wäre.

Demnach hat die tatsächliche Morphologie der Krone und ihrer tragenden Teile eine wichtige Bedeutung.

Schlanke und hohe Stämmlinge erfahren eine stärkere Auslenkung unter Last und biegen sich stärker durch, bevor das Primärversagen der Holzfasern einsetzt oder sich Risse in einer Gabelung bilden. Zusätzlich variiert die Proportionalitätsgrenze gemäß Stuttgarter Festigkeitskatalog (WESSOLLY & ERB 2014) zwischen den dort verzeichneten Arten um mehr als Faktor 2. Auch bei gleicher Kronenstruktur und Einbauhöhe kann dadurch die kritische Durchbiegung für manche Baumarten stark abweichen.

Die seitliche Auslenkung f_{\max} der Befestigungsposition, bei der das Primärversagen des gesicherten Kronenteils einsetzen würde, hängt direkt mit der Einbauhöhe l und der Schlankheit (Verhältnis zwischen Einbauhöhe l und Durchmesser d) zusammen. Zudem sind hier die unterschiedlichen Belastbarkeitsgrenzen der Baumarten zu beachten, ausgedrückt über die Proportionalitätsgrenze ϵ des grünen Holzes, die sich 1:1 auf die bis zum primären Bruch erforderliche Durchbiegung eines Kronenteils auswirkt.

$$f_{\max} = \epsilon \times \frac{l}{d} \times l$$

Bei halbem Durchmesser wäre die kritische Auslenkung in der gleichen Einbauhöhe doppelt so groß, da sich die Schlankheit verdoppelt. Bei gleichem Durchmesser, aber doppelter Einbauhöhe wäre die Auslenkung an der Befestigungsposition viermal so groß, da sich Schlankheit und Einbauhöhe zugleich verdoppelt haben. Auch diese Formel lässt sich eigentlich nur auf Holzzylinder mit konstantem Querschnitt anwenden,

der Effekt wird bei abholzigen Stämmlingen durch den abnehmenden Durchmesser noch verstärkt.

Stämmlinge können jedoch in der Realität sowohl in ihrer Form sehr unregelmäßig als auch hinsichtlich der Materialeigenschaften sehr inhomogen sein. Beide Parameter lassen sich derzeit nicht ausreichend genau bestimmen, um an dieser Stelle exakte Berechnungen möglich zu machen. Als allgemeine Richtschnur können aber die Einbauhöhe, die Schlankheit der verbundenen Kronenteile und die baumartenspezifischen Materialeigenschaften des Holzes durchaus herangezogen werden (Tabelle 2).

Ist die verwendete Sicherung zu starr, können erhöhte Belastungen der Kronensicherung durch die Einschränkung der Bewegungen im Wind auftreten. Vor allem in grundsätzlich schwingungswilligen Kronen wäre in solchen Fällen durchaus auch eine Veränderung der dynamischen Eigenschaften sowie der baum-eigenen Anpassungsmechanismen zu befürchten.

5 Schlussfolgerungen

Die Erfahrungen aus 30 Jahren Einsatz textiler Systeme und die neuen Erkenntnisse zur Dynamik von Bäumen im natürlichen Wind ermöglichen inzwischen belastbare Aussagen zur biomechanischen Funktionsweise und praktischen Anwendbarkeit der Kronensicherung. In absehbarer Zeit werden aber weder eine laser-gestützte Vermessung der Baumstruktur noch die Weiterentwicklung computerbasierter Simulationen dazu führen, dass der Einbau von Kronensicherungen voll-

Tabelle 2: Elastizitätsgrenzen grüner Hölzer (nach Wessolly & Erb 2014)

Baumarten	Proportionalitätsgrenze
Esche, Esskastanie, Feld-Ahorn, Platane, Stiel-Eiche, Walnuss	ca. 0,40-0,43 %
Eschen-Ahorn, Hybrid-Pappel, Silber-Ahorn, Tulpenbaum, Ulme	ca. 0,35 %
Berg-Ahorn, Birke, Kiefer, Lärche, Säulen-Pappel, Robinie, Rot-Eiche	ca. 0,30 %
Buche, Erle, Götterbaum, Linde, Mehlbeere, Rosskastanie, Spitz-Ahorn	ca. 0,25 %
Hainbuche, Pinie, Tanne, Weide, Zeder	0,16- ca. 0,20%

ständig im Voraus geplant und rechnerisch abgesichert werden kann. Hierzu wird weiterhin die fachliche Zusammenarbeit der Gutachter und Kontrolleure mit erfahrenen Baumpfleger*innen erforderlich bleiben.

Für die Ausschreibung dieser Arbeiten bietet die ZTV-Baumpfleger*innen ein sinnvolles Grundgerüst, das gegebenenfalls erweitert werden sollte, um die Leistung eindeutig, nachvollziehbar und kalkulierbar zu beschreiben. Diese Anforderungen können einen Mehraufwand im Vorfeld verursachen. Auch an die Ausbildung der Fachleute, die Maßnahmen im Zuge von Regelkontrollen oder Pflegemaßnahmen empfehlen, wären erheblich höhere Anforderungen zu stellen als früher. Bis dato gibt es aber nur sehr wenige maßgebliche Konflikte mit den ausführenden Firmen, die einen solchen Schritt erzwingen würden. Es bleibt zu hoffen, dass die Zusammenarbeit sich weiterhin so einfach gestaltet. Im Hinblick auf die zukünftige Entwicklung des Fachgebiets Baumpfleger*innen und Baumkontrolle wäre es aber dennoch wünschenswert, das Thema Kronensicherung in Forschung, Ausbildung und Regelwerken sowie in der einschlägigen Fachliteratur weiterhin zu vertiefen.

Literatur

BAKER, C. J., 1997: Measurements of the natural frequencies of trees. *Journal of Experimental Botany*, 48(310), 1125–1132.

BALL, J. ; KONDA, T., 2000: Cobra: An Examination of an Alternative Tree Support System. *Tree Care Industry Magazine* (March): 8–16.

BETHGE, K.; MATTHECK, C.; SCHRÖDER, K., 1994: Dimensionierung von Kronensicherungssystemen ohne Windlastabschätzung. *Das Gartenamt* (4) S. 257–259.

BRUDI, E.; LESNINO, G.; SPIEß, C., 1999: Erfolgskontrolle des „cobra-Kronensicherungssystems“. *Neue Landschaft*, 44, 516–521.

BUSEMANN, K., 2013: Umgang mit alten Kronensicherungen – Wartung, Kontrolle und Ausmusterung. Vortrag im Kletterforum der Deutschen Baumpfleger*innen, Augsburg.

CAMPIFORMIO, A. T., 2012: An Investigation of *Fraxinus americana* Branch Sway Using a 3 Dimensional Motion Capture System (Master's Theses). University of Connecticut.

DAHLE, G.; JAMES, K.; KANE, B.; GRABOSKY, J.; DETTER, A., 2017: A review of factors that affect the static load-bearing capacity of urban trees. *Arboriculture & Urban Forestry*, 43(3), 89–106.

DELLWIK, E.; VAN DER LAAN, M. P.; ANGELOU, N.; MANN, J.; SOGACHEV, A., 2019: Observed and modelled near-wake flow behind a solitary tree. *Agricultural and Forest Meteorology* (265): 78–87.

DETTNER, A., 2017: Hält der? Grüne Äste als Ankerpunkt. *TASPO BAUMZEITUNG* (4): 37–41.

DETTNER, A.; BISCHOFF, F.; BRUDI, E., 2009: Bäume in Hochseilgärten und Kletterparks. Aspekte einer aktuellen Nutzungsform. In: DUJESIEF-

KEN, D. (Hrsg.): *Jahrbuch der Baumpfleger*innen* 2009, Haymarket Media, Braunschweig, 145–158.

DETTNER, A.; BRUDI, E.; BISCHOFF, F., 2004: Kronensicherungen – Was bewirkt der Durchgang des Seiles? *Kletterblatt*, 54–55.

DETTNER, A.; BRUDI, E.; BISCHOFF, F., 2005: Dehnung und Elastizität in Baumpfleger*innen und SKT. *TASPO BAUMZEITUNG* (2), 40–42.

DETTNER, A.; COWELL, C.; MCKEOWN, L.; HOWARD, P., 2008: Evaluation of Current Rigging and Dismantling Practices Used in Arboriculture (Research Report No. RR668) (S. 361). Norwich, UK: Health and Safety Executive, UK.

DETTNER, A.; RICHTER, K.; RUST, S., 2015: Aktuelle Untersuchungen zum Primärversagen von grünem Holz. In: DUJESIEFKEN, D. (Hrsg.): *Jahrbuch der Baumpfleger*innen* 2015, Haymarket Media, Braunschweig, 156–167.

DIN Deutsches Institut für Normung, 1998: DIN EN 1891. Persönliche Schutzausrüstung zur Verhinderung von Abstürzen – Kernmantelseile mit geringer Dehnung; Deutsche Fassung EN 1891:1998-06

FLL Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V., 2001: Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Baumpfleger*innen, ZTV-Baumpfleger*innen, Bonn

FLL Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V., 2017: Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Baumpfleger*innen, ZTV-Baumpfleger*innen, Bonn

GORDON, J. E., 1984: *The new science of strong materials, or, Why you don't fall through the floor*. Princeton, N.J.: Princeton University Press.

GRECO, C. M.; LEE, A.; HAM, D.; SMILEY, E. T.; LAW, E. H., 2004: A computer simulation of an alternative design to tree crown support systems. *Journal of Arboriculture* 30: 365–370.

HOFFMANN, L.; RUST, S., 2018: Spektrale Auswertungen von TMS Daten. Vortrag auf den Osnabrücker Baumpflegetagen.

JAMES, K. R., 2002: An engineering study of tree cables. *Arborist News*, (4), 35–39.

JAMES, K. R., 2010: *A Dynamic Structural Analysis Of Trees Subject To Wind Loading*. PhD thesis. University of Melbourne.

JAMES, K. R.; DAHLE, G. A.; GRABOSKY, J.; KANE, B.; DETTER, A., 2014: *Tree Biomechanics Literature Review: Dynamics*. *Arboriculture & Urban Forestry* 40, 1–15.

KANE, B., 2018: The effect of simulated trunk splits, pruning, and cabling on sways of *quercus rubra* L. *Trees*, 32(4), 985–1000.

KANE, B.; AUTIO, W., 2014: Installing cables did not affect annual radial increment in co-dominant stems of red oaks. *Urban Forestry & Urban Greening*, 13(3), 443–449.

KANE, B.; RYAN, D., 2002: Discoloration and decay associated with hardware installations in trees. *Journal of Arboriculture*, 28(4), 187–193.

LEE, L. S. H.; JIM, C. Y., 2018: Applying precision triaxial accelerometer to monitor branch sway of an urban tree in a tropical cyclone. *Landscape and Urban Planning*, 178, 170–182.

PIETRUSCHINSKI, M., 2014: Doppelt hält besser. *TASPO BAUMZEITUNG* (4), 38–40.

REILAND, M.; KANE, B.; MODARRRES-SADEGHI, Y.; RYAN, H. D. P., 2015: The effect of cables and leaves on the dynamic properties of red oak (*Quercus rubra*) with co-dominant stem. *Urban Forestry & Urban Greening* 844–850.

ROIGNANT, J.; BADEL, É.; LEBLANC-FOURNIER, N.; BRUNEL-MICHAC, N.; RUELLE, J.; MOULIA, B.; DECOURTEIX, M., 2018: Feeling stretched or compressed? The multiple mechanosensitive responses of wood formation to bending. *Annals of Botany*, 121(6), 1151–1161.

RUST, S.; BRAUN, G.; MAURER, L.; DETTER, A., 2013: Verändern Kronensicherungen das Schwingungsverhalten von Bäumen? In: DUJESIEF-

SIEFKEN, D. (Hrsg.): Jahrbuch der Baumpflege 2013. Haymarket Media, Braunschweig, 292–295.

SCHINDLER, D.; MOHR, M., 2019: No resonant response of Scots pine trees to wind excitation. *Agricultural and Forest Meteorology* 265: 227–244.

SCHINDLER, D.; SCHÖNBORN, J.; FUGMANN, H.; MAYER, H., 2013: Responses of an individual deciduous broadleaved tree to wind excitation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 177, 69–82. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.04.001>.

SCHRÖDER, K., 1991: Der Doppelgurt „System Osnabrück“ im Test. *Das Gartenamt* (40).

SCHRÖDER, K., 1998: Kronensicherung mit „Doppelgurtsystem Osnabrück“ – Entwicklungen und Erfahrungen seit 1990. In: DUJESIEFKEN, D.; KOCKERBECK, P. (Hrsg.): *Jahrbuch der Baumpflege 1998*, Thalacker Medien, Braunschweig, 170–183.

SCHRÖDER, K., 2002a: Die Auffangsicherung – integrales Element der Kronensicherung. *grünFORUM.LA* 9, 18–21.

SCHRÖDER, K., 2002b: Zur Ruckdämpfung von Kronensicherungssystemen. *Mechanische Aspekte vitaler Bäume. LA Landschaftsarchitektur* (3) 22–25.

SCHRÖDER, K., 2004: Dimensionierung von Kronensicherungen. *grünFORUM.LA* 2, 44–46.

SHIGO, A., 1991: *A New Tree Biology*. Shigo and Tree Associates, Durham, NH., USA.

SINN, G., 1989: Ein neues Kronensicherungssystem zur Verkehrssicherheit von Bäumen. *Neue Landschaft*, (34), 592–594.

SINN, G., 2002: Das Dynamik-Gurtseil für Baumkronensicherungen. *Stadt und Grün*, (6).

SINN, G., 2009a: *Baumkronensicherungen*. Stuttgart: Ulmer.

SINN, G., 2009b: *Dynamische Baumkronensicherungen*. AFZ-DerWald, 1310–1311.

SINN, G.; SINN, T., 2005: Auswahlkriterien und Bemessung textiler Kronensicherungen. *Pro Baum*, (2), 18–24.

SMILEY, E. T., 1998: Countersinking for tree bolts. *Journal of Arboriculture*, 24(5), 245–247.

SMILEY, E. T.; LILLY, S., 2007: Best management practices: tree support systems: cabling, bracing, and guying. Champaign, IL: International Society of Arboriculture.

SPATZ, H.-C., 2003: Kronensicherung und Auffangsicherung. Ein Kommentar zur ZTV-Baumpflege 2001, Tabelle 1 des Anhangs. *Stadt + Grün* (6) S. 43–45

SPATZ, H.-C.; BRÜCHERT, F.; PFISTERER, J., 2007: Multiple resonance damping or how do trees escape dangerously large oscillations? *American Journal of Botany* 94 (10): 1603–1611.

SPATZ, H.-C.; THECKES, B., 2013: Oscillation damping in trees. *Plant science* 207: 66–71.

SPATZ, H.-C.; PFISTERER, P., 2013: Mechanical Properties of Green Wood and Their Relevance for Tree Risk Assessment. *Arboriculture & Urban Forestry*. 39(5), 218–225.

STOBBE, H.; DUJESIEFKEN, D.; SCHRÖDER, K., 2000: Tree Crown Stabilization with the double-belt system Osnabrück. *Journal of Arboriculture* 26 (5): 270–274.

TESARI, I.; MUNZINGER, M.; MATTHECK, C., 2003: Untersuchungen zu Kronensicherungssystemen. In: Tagungsband VTA-Seminar. Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH.

THOMSEN, U., 2003: Umfangzunahme von Laubbaumästen, zitiert bei WESSOLLY, L. (2007).

WÄLDCHEN, M., 2007: Praxis der Baumkontrolle und -pflege: Die Beurteilung von Zwieseln. *AFZ-DerWald*, 406–407.

WENGER R.; WITTMANN, G., 2010: *Sicherungsseile in Kletterwäldern*. Diplomarbeit FH Weihenstephan, Fakultät Landschaftsarchitektur.

WESSOLLY, L., 2005: Neue ZTV-Baumpflege (Gelbdruck) – Kronensicherung. *proBaum* (5), 2–10.

WESSOLLY, L., 2006: Kronensicherung in der neuen ZTV-Baumpflege 2006. *AFZ-DerWald*, (8).

WESSOLLY, L., 2007: Dynamische und statische Kronensicherungen sowie Trag-/Haltesicherungen – Hinweise zum fachgerechten Einbau und zur Kontrolle. In: DUJESIEFKEN, D.; KOCKERBECK, P. (Hrsg.): *Jahrbuch der Baumpflege 2007*. Haymarket Media, Braunschweig, 252–265.

WESSOLLY, L., 2009: Stellungnahme zum Beitrag von G. Sinn: dynamische Baumkronensicherungen. *AFZ-DerWald* (24) 1313–1315.

WESSOLLY, L., 2014: Windlasten, Schwingungsverhalten von Bäumen und dynamische Kronensicherungen. *Beitrag Osnabrücker Baumpflegetage*.

WESSOLLY, L.; ERB, M., 2014: *Handbuch der Baumstatik und Baumkontrolle*. Patzer, Berlin; Hannover.

WESSOLLY, L.; VETTER, H., 1995: Kronensicherung in Bäumen. *Neue Landschaft* (2), 104–110.

WESSOLLY, L.; VETTER, H., 1998: Tipps und Tricks bei der Kronensicherung von Bäumen. *Neue Landschaft* 43 (10), 747–750.

Autor

Andreas Detter ist Dipl. Ing. der Landespflege und öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger. Er ist Mitglied des Vorstands der Sachverständigen-Arbeitsgemeinschaft SAG Baumstatik e.V. und im Büro Brudi & Partner TreeConsult in Gauting bei München als Sachverständiger und Referent tätig.

*Dipl.-Ing. Andreas Detter
ö.b.v. Sachverständiger
Brudi & Partner
TreeConsult
Berengariastraße 9
82131 Gauting
Tel. (089) 75 21 50
a.detter@tree-consult.org*

