

Mechanische und baubiologische Auswirkungen von Asteinkürzungen

Mechanical and biological consequences of branch reductions

B. Sc. Olaf Florin

Prof. Dr. Steffen Rust

Zusammenfassung

Bei der Einkürzung von Grob- und Starkästen von Eichen zeigte sich, dass bereits relativ kleine Eingriffe deutliche Auswirkungen auf die statische und die baubiologische Situation haben. Das Biegemoment lässt sich durch geringe Eingriffe bereits effektiv reduzieren, gleichzeitig wird dadurch schon ein beträchtlicher Teil der Blattmasse entfernt. Eine Einkürzung um 10 % reduzierte die Blattmasse bereits um durchschnittlich über 20 % und das Biegemoment in der Astbasis um 8 %. Bei Entfernung von 20 % der Länge waren es im Durchschnitt bereits 45 % der Blattmasse und 22 % des Biegemoments. Unsere Ergebnisse deuten darauf hin, dass in vielen Fällen eine Einkürzung um 10 % der Astlänge ausreichen sollte, um die Grundsituation des Astes wesentlich zu verändern. Zu starke Eingriffe erhöhen zudem durch hohe Verluste an Blattmasse die Gefahr von absterbenden Astbereichen am eingekürzten Ast.

Summary

Branches of oak were reduced in length incrementally. Even relatively small pruning doses had substantial effects on branch biomechanics and leaf area. A reduction cut of 10 % reduced leaf mass by more than 20 % and bending moments by 8 %, while reducing a branch by 20 % of its length caused a loss of 45 % of its leaf mass and 22 % in bending moment. In most cases, reducing branch length by 10 % should be sufficient. Heavier reductions will severely reduce leaf area and increase the risk of branch dieback.

1.0 Einleitung

Asteinkürzungen gehören zum Arbeitsalltag der Baumpflege. Sie werden durchgeführt, wenn Defekte am Ast, z. B. Faulstellen und Risse, oder das Baumumfeld es erforderlich machen. Besonders lange Äste werden bisweilen aber auch ohne Defektsymptome eingekürzt. Dadurch sollen in der Regel die Segelfläche und der lastabtragende Hebelarm verkürzt werden. Unabhängig davon, ob ein Defekt vorhanden ist oder nicht, sollen Einkürzungen in der Regel einem Ausbrechen des Astes vorbeugen und somit der Verkehrssicherheit dienen.

In der ZTV-Baumpflege werden zum Umfang von Asteinkürzungen im Gegensatz zu Kroneneinkürzungen keine Angaben gemacht. Gute Baumpflege geht dabei nach dem Credo „so viel wie nötig, so wenig wie möglich“ vor. In Bezug auf das tatsächlich Nötige herrscht dabei oft eine starke Verunsicherung, weil Reduzierungen von Segelfläche und Last nur geschätzt werden können. Der baumbiologisch bedeutende Verlust an Blattfläche wird dabei oft zu Gunsten der Sicherheit in den Entscheidungskriterien hinten angestellt. Durch zu starke Eingriffe kann aber die Bildung von abgestorbenen Astbereichen oder Reiteraten provoziert werden, sodass die Maßnahme letztlich nicht nachhaltig ist. Im Sinne der Nachhaltigkeit ist zudem von Bedeutung, dass in Verbindung mit innerstädtischem Großgrün nicht nur dem sozialen Aspekt über die Aufrechterhaltung der Verkehrssicherheit Genüge getan wird, sondern auch auf die Wirtschaftlichkeit geachtet wird. So kosten kleinere Eingriffe in der Regel nicht nur unmittelbar weniger, sie verursachen sehr häufig auch deutlich geringere Folgekosten als größere Eingriffe. Schließlich können größere Eingriffe die Lebenserwartung eines Baumes im Vergleich zu einem Baum, der in Anzahl und Umfang minimierten Eingriffen ausgesetzt war, erheblich verkürzen. Kleinere Eingriffe verbessern so durch längere Standzeiten der Bäume nicht nur die ökologische Situation in den Städten, dadurch müssen gleichzeitig Ersatzinvestitionen erst später getätigt werden und die höhere Wohlfahrtswirkung eines Großbaumes im Vergleich zu einem Jungbaum bleibt länger erhalten.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die mechanische Entlastung und den Blattflächenverlust durch unterschiedlich starke Asteinkürzungen zu untersuchen. Für die Praxis sollen Hinweise für angemessene Asteinkürzungen abgeleitet werden, bei denen der Blattverlust des Baumes möglichst gering bleibt.

2.0 Stand des Wissens

In Deutschland werden die „Allgemeinen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien“ (kurz: ATV) bei allen Arbeiten angewendet, bei denen öffentliche Gelder ausgegeben werden oder bei

denen die Normen des Deutschen Instituts für Normung (kurz DIN-Normen) Grundlage der Ausführung sind. Für Baumpflegearbeiten gelten in beiden Fällen die „Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für Baumpflege“ (ZTV-Baumpflege) als Ergänzung zu den ATV. In der ZTV-Baumpflege wiederum wird für Kroneneinkürzungen als Sondermaßnahme je nach den vorliegenden Erfordernissen ein Höchstmaß von 20 % der gesamten Kronenhöhe empfohlen (FLL 2006). Dabei soll der Umfang der Einkürzung insbesondere von Baumart und Habitus abhängig gemacht werden. Die Einkürzung von Kronenteilen, also einzelnen Ästen, stellt ebenfalls eine Sondermaßnahme dar. Hier ist jedoch keine Empfehlung für den Maximalumfang gegeben. Entscheidend sind lediglich die Erfordernisse der Verkehrssicherheit und des Baumumfeldes. In der Baumpflegepraxis wird daher bei Asteinkürzungen häufig in Anlehnung an die Empfehlung für Kroneneinkürzungen gehandelt. Dabei wird oft der maximale Richtwert von 20 % ausgeführt, in einigen Fällen geht man sogar darüber hinaus. In den meisten Fällen soll dabei den Erfordernissen der Verkehrssicherheit Genüge getan werden, besonders dann, wenn Defekte am Ast vorhanden sind, die dessen Bruchsicherheit beeinträchtigen könnten. In der Praxis werden zudem häufig auch besonders lange Äste ohne Defekt eingekürzt. Hier wird dann in der bloßen Länge des Astes und den damit verbundenen Hebellasten bei Wind eine erhöhte Bruchgefahr gesehen.

Einen Einfluss auf Asteinkürzungen - mit oder ohne Defekt - dürften nicht zuletzt auch die seit einigen Jahren in der Fachwelt diskutierten Aussagen bezüglich der Auswirkungen des Schlankheitsgrades von Ästen haben. Der Schlankheitsgrad wird durch den Quotienten aus Astlänge (l) und Astdurchmesser (D) beschrieben. Einige Autoren verweisen mehr oder weniger direkt auf einen Zusammenhang zwischen Bruchgefahr und dem so genannten l/D -Verhältnis. So geben WESSOLLY & ERB (1998) zunächst für den Schnitt am Großbaum die Empfehlung, Äste, die aus dem Kronenmantel herausragen, rechtzeitig einzukürzen, um späterem Brechen vorzubeugen. Für den Altbaum nennen sie den seltenen Bedarf eines Kronenrückschnittes bei statisch überbelasteten Kronen. Falls keine andere Art der Sicherung möglich oder sinnvoll ist, müssten vor allem weit herausragende Äste fachgerecht eingekürzt werden. Grundsätzlich bewerten WESSOLLY & ERB weit herausragende, flache Äste als potentiell bruchgefährdet. Insbesondere bei länger werdenden Hebelarmen steige die Bruchgefahr, wenn nicht die Dicke des Hebelarms im gleichen Maße zunehme, was einem Hinweis auf das l/D -Verhältnis entspricht.

PFISTERER (1999) weist auf den möglichen Bedarf einer Sicherung von Starkästen vor windbedingtem Ausbruch hin. Er verweist auf die einfache Möglichkeit, die Baumkrone in Ausdehnung und Höhe zu reduzieren. Besonders empfehlenswert sei dies für Gehölzarten mit

geringer Holzelastizität. Im Folgenden geht er explizit auf Bäume in Windlagen ein, deren Windwiderstand sich unter anderem durch Einkürzungen effektiv reduzieren lassen. In neueren Untersuchungen entwickeln PFISTERER & SPATZ (2010) darüber hinaus das Modell der Dämpfungskaskade. Demnach werden in einer Baumkrone von außen nach innen bei Windbelastung Schwingungen erzeugt, die durch den individuellen Luftwiderstand und die jeweilige Materialdämpfung des Baumteils schon einen Teil der Bewegungsenergie neutralisieren. Dadurch wird nur noch ein geringerer Teil der vom Wind erzeugten Bewegungsenergie auf Baumteile nächst niedrigerer Ordnung und damit in das Kroneninnere weitergegeben.

MATTHECK (2002) schließlich gibt für das Höhe/Durchmesser-Verhältnis von Bäumen einen Wert von etwa 50 an, ab dem die Wahrscheinlichkeit für ein Versagen (Brechen) wegen eines zu dünnen Stammfußes steige. Die vermeintlichen Konsequenzen dieser Aussage wurden in der praktischen Baumpflege relativ schnell auch auf Äste angewandt. Eine Weiterentwicklung des H/D-Verhältnisses stellt das l/D-Verhältnis dar (MATTHECK 2007) und bestätigt somit gewissermaßen die Anwendung auf Äste. Gesunde Äste brechen demnach oberhalb eines Wertes von $l/D=40$ deutlich häufiger als darunter. Eingeschränkt wird dieser Ansatz der Astbeurteilung durch den Hinweis auf eine seitliche Stützwirkung der betrachteten Äste durch benachbarte Äste (MATTHECK 2007). Für beide Verhältnisse werden die Grenzwertaussagen spätestens seit 2007 zum Teil heftig und kontrovers diskutiert (z.B. GRUBER 2007; FINK 2008; MATTHECK & BETHGE 2008; KLÖHN 2009).

Bäume und Äste wurden zwar auch schon vor den oben genannten Veröffentlichungen eingekürzt, da aber offenbar der Bedarf der Praxis nach Handlungsempfehlungen groß war, fanden diese schnell eine weite Verbreitung. Besonders wenn augenscheinlich eine Gefahr droht, könnten solche konkreten Empfehlungen willkommen gewesen sein. Dabei wird zumindest das H/D-Verhältnis bei kritischer Betrachtung lediglich als ein Indiz von vielen zur Bewertung einer potentiellen Bruchgefahr bei Belastung durch Wind oder andere Dauerbelastungen wie z. B. Schnee angesehen (LONSDALE 1999).

Über die statisch-mechanischen Aspekte hinaus haben Baum- und Asteinkürzungen aber auch baumbiologische Konsequenzen, die das Maß der Einkürzungen begrenzen sollten. Diese sind bekannt und werden - soweit die baumbiologische Betrachtung eine Rolle spielt - in der Literatur angesprochen (z. B. SIEWNIAK & KUSCHE 1984; WESSOLLY & ERB 1998; PFISTERER 1999; VON MALEK *et al.* 1999; PIETZARKA 2008). Neben den mit ihrer Größe zunehmenden negativen Folgen von Schnittwunden ist in erster Linie die beeinträchtigte Photosynthese zu nennen. Die Photosynthese ist der zentrale physiologische Prozess in grünen Pflanzen. Werden Blätter in

größerem Umfang entnommen, z. B. durch Schnittmaßnahmen, sinkt die Photosyntheseleistung des beschnittenen Astes und damit des Baumes. Dadurch stehen weniger Assimilate zur Versorgung der verbleibenden Baumteile zur Verfügung. Diese Verluste als Folge einer Einkürzung dürften etwa proportional zur entnommenen Blattfläche sein. Der betroffene Baum wird in der Regel versuchen, die verlorene Blattfläche so schnell wie möglich wieder auszugleichen, z. B. durch Reiterate.

3.0 Material und Methoden

3.1 Material

Um die nötigen Daten zur Untersuchung der Fragestellung zu erhalten, wurden in der Revierförsterei Reinhausen bei Göttingen an ausgesuchten Bäumen der Art Stiel-Eiche (*Quercus robur*, L.) einzelne Äste systematisch eingekürzt. Sie stehen als Randbäume an der östlichen Seite einer im Wald gelegenen Freifläche. Diese Fläche hat eine Ausdehnung von etwa 140 m in

Nordsüdrichtung und etwa 90 m in Ostwestrichtung und ist mit Gras bewachsen. Ebenfalls am östlichen Rand der Freifläche befindet sich zwischen Freifläche und Bäumen ein Versorgungsweg. Dieser weist einen Abstand von 3 bis 5 m zu den Bäumen auf. Durch die Freifläche weisen die Bäume in Richtung Westen einen mehr oder weniger ausladenden Kronenaufbau auf (Abbildung 1).



Abb. 1) Versuchsstandort mit einigen Versuchsbaumen aus Richtung Westen. Durch die Wiese konnten die Bäume in westliche Richtung ausladende Kronen ausbilden.

3.2 Methoden der Astauswahl

Eine erste Aufnahme der Bäume mit potentiell verwertbaren Ästen erfolgte in unbelaubtem Zustand am 25.04.2008. Diese Aufnahme wurde vom Boden aus vorgenommen, zum Teil mit Hilfe eines Fernglases. Die Äste wurden dabei im Wesentlichen nach vier Gesichtspunkten ausgesucht: Vitalität

des gesamten Baumes sowie des betreffenden Astes, Aststruktur und Astdimension. Die Vitalitätsbeurteilung erfolgte nach ROLOFF (2001). Dabei wurde darauf geachtet, dass die ausgewählten Bäume an Hand ihrer Verzweigungs- und Kronenstruktur möglichst mit Vitalitätsstufe 1 angesprochen werden konnten. Da sich nicht genügend eindeutige Bäume dieser Vitalitätsstufe finden ließen, wurden einige Bäume hinzugenommen, die in eine Übergangsphase zwischen Vitalitätsstufe 1 und 2 eingestuft wurden.

Die Verzweigungsstruktur der einzelnen Äste entsprach der Vitalität des Gesamtbaumes. Bezüglich der Aststruktur wurden die Äste nach einem möglichst gleichmäßig waagerechten Verlauf und einer durchgängigen Hauptachse ausgesucht. Das heißt, es waren bis weit in die vorderen (stammentfernten) Astregionen keine kodominanten Verzweigungen vorhanden. Ferner wurden nur Äste aufgenommen, die keine offensichtlichen Schäden und - neben altersbedingtem Totholz im Feinastbereich - kein Totholz über Schwachaststärke oder Reiterate aufwiesen. Zunächst wurden nur Äste ausgewählt, die eine Länge von über 6 m bei möglichst geringem Astdurchmesser an der Astbasis hatten. Astlänge und Durchmesser wurden dabei vom Boden aus geschätzt. So wurden 15 in Frage kommende Bäume ausgewählt. Kleinere Äste sollten am Tag der Datenerhebung zusätzlich aufgenommen werden.

Bei einer zweiten Besichtigung am 21.05.2008 wurden die ausgesuchten und nunmehr belaubten Bäume erneut in ihrer Vitalität angesprochen. Dabei konnte jetzt der Zustand der Belaubung mit in die Beurteilung eingehen. Da eine Betrachtung der Belaubung eine Vitalitätsbeurteilung an Hand der Kronenstruktur unterstützen kann und nicht außer Acht gelassen werden sollte (ROLOFF 2001), erfolgte eine gesonderte Vitalitätsbeurteilung nach Kronenverlichtung. Die Kronenverlichtung konnte in Verbindung mit EVERS *et al.* (ohne Jahr) mit maximal 15 % beschrieben werden. Damit entsprach sie der Verlichtungsstufe 1 der Tabelle zur Herleitung der Schadstufen im Rahmen der bundesweiten Waldzustandserhebung des Umweltbundesamtes (UMWELTBUNDESAMT 2007). Die Farbe der Belaubung entsprach maximal der Vergilbungsstufe 1 derselben Tabelle, so dass sich im Ergebnis die Schadstufe 1 ergab. Diese wird in obiger Quelle als ein Bereich der natürlichen Variabilität des Belaubungszustandes beschrieben, der eine Übergangsphase zu deutlich geschädigten Bäumen darstellt.

3.3 Methoden des Astabbaus und der Datenerfassung

Die Datenerhebung erfolgte am 26. und 27.07.2008 durch zwei Arbeitsgruppen zu je sieben Personen. Jede Arbeitsgruppe verfügte über eine Hubarbeitsbühne auf einem 7,5 t LKW-Fahrgestell

mit einer maximalen Arbeitshöhe von 26 m.

Zunächst wurde die Gesamtlänge des zu bearbeitenden Astes mit einem 25 m-Bandmaß ermittelt. Dazu wurde am äußeren Rand der verdickten Astbasis ein Nagel eingeschlagen und das Bandmaß auf der Astoberseite in möglichst geradem Verlauf bis zur Astspitze ausgerollt. Nach Feststellung der Länge wurden die äußeren 50 % des Astes in Segmente zu je 10 % bezogen auf die Gesamtlänge eingeteilt und die Segmentgrenzen mit Sprühfarbe markiert. Die inneren 50 % wurden während der Datennahme nicht unterteilt und als ein Segment betrachtet. Dies geschah in der Annahme, dass die wesentlichen Bereiche des Astes im Hinblick auf die Baumphysiologie und die statischen Veränderungen bei Einkürzung in den äußeren Astregionen zu finden sind. Zudem liegt eine Einkürzung um 50 % weit jenseits der normalerweise vorgesehenen Einkürzung von Kronenteilen.

Anschließend wurde an der Astbasis der Astwinkel gegenüber der Senkrechten bestimmt. Dazu wurden aufklappbare Winkelmesser verwendet, wie sie z. B. im Innenausbau oder im Garten- und Landschaftsbau eingesetzt werden. Ein Schenkel des Winkelmessers wurde mit dem durchschnittlichen horizontalen Verlauf der Astachse in Einklang gebracht. Im anderen Schenkel befindet sich eine Wasserwaage, mit deren Hilfe dieser im Lot gehalten werden kann.

Auf der Astoberseite wurde ein Elastometer möglichst nah am äußeren Ende der verdickten Astbasis eingebaut (Abbildung 2). Dieses Gerät wird bei der Elastomethode zur Ermittlung der Bruchsicherheit an Bäumen eingesetzt. Es misst Längenänderungen über eine feste und eine bewegliche Messnadel mit einem Abstand von 200 mm zueinander auf 1 µm genau. So kann bei



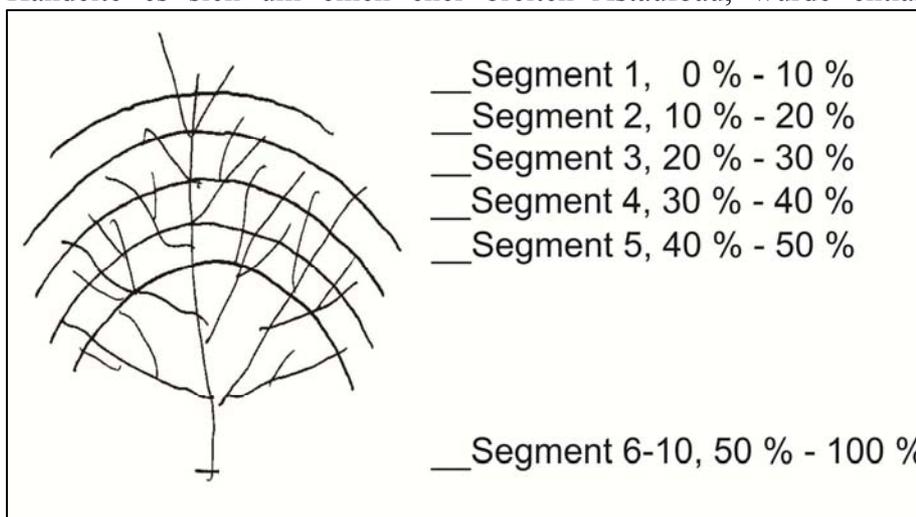
einem Zugversuch die Dehnung zwischen den Nadeln erfasst werden (WESSOLLY & ERB 1998). In unserem Falle wurde die Verkürzung der repräsentativen Randfaser und damit die Stauchung gemessen. Beim Einbau wurde darauf geachtet, das Gerät auf einem geraden Astabschnitt zu installieren, um Fehlmessungen durch schon vorhandene

Abb. 2) Eingebautes Elastometer auf der Astoberseite in der Nähe der verdickten Astbasis.

Astbiegungen nach oben oder unten zu vermeiden (DETTNER, mündl. Mitteilung Juli 2008). Dadurch kam es zu unterschiedlichen Einbautentfernungen zur Astbasis. Der Abstand zwischen dem Ende der verdickten Astbasis und der ersten, zur Astbasis gerichteten, Nadel des Elastometers wurde jeweils mit einem Zollstock gemessen.

Der Durchmesser des Astes wurde in der Mitte zwischen den Nadeln des Elastometers gemessen, da dies der Bereich des Astes ist, für den das Elastometer die Randfaserverkürzung erfasst. Dieser Punkt wird im weiteren Verlauf P_0 genannt. Weil zudem bekannt ist, dass Äste mit zunehmendem Wachstum unter Umständen elliptische bzw. ovale Querschnitte in Richtung der durch das Eigengewicht der Äste wirkenden Biegekräften bilden (WESSOLLY & ERB 1998; PFISTERER 1999), wurde der Durchmesser sowohl vertikal als auch horizontal gemessen. Die Messung selbst erfolgte mittels einer forstlichen 30 cm-Messkluppe auf 0,5 cm genau.

Bei der folgenden segmentweisen Einkürzung der Äste wurde bezüglich der Schnittführung der einzelnen Schnitte **nicht** auf gute fachliche Praxis geachtet. Da es in diesem Versuch um möglichst genaue Werte für die Einkürzungen in 10 %-Schritten ging, wäre eine Berücksichtigung der Regeln zur Einkürzung von Ästen, wie sie z. B. in Abschnitt 3.1.1 der ZTV-Baumpflege enthalten sind, nicht sinnvoll gewesen. Eine Anlehnung erfolgte allerdings an Abschnitt 3.1.9.3 „Kroneneinkürzung“ der ZTV-Baumpflege. Hiernach sollte die verbleibende Krone einen möglichst arttypischen Habitus behalten (FLL 2006). Da dies nach Meinung der Autoren auch für eine möglichst natürliche Astform nach einer Einkürzung gelten sollte, wurden die Schnittlinien zur Entnahme der 10 %-Segmente der jeweiligen Ausgangsform der Äste angepasst (Abbildung 3). Handelte es sich um einen eher breiten Astaufbau, wurde entlang einer gedachten, nahezu



kreisrunden Zirkellinie geschnitten. War der Aufbau des Astes eher schmal, wurde die Schnittlinie zu einer entsprechend elliptischen Form entlang der Astachse angepasst. Das letzte Segment endete unmittelbar vor dem Elastometer.

Abb. 3) Schematische Darstellung der Schnittlinien für die einzelnen Segmente

Nach dem jedem Einkürzungsschritt um ein Segment wurden der neue Elastometerwert, die Gesamtmasse des Segments und die Blattmasse des Segments erfasst. Dazu wurden die Blätter manuell vom Holz getrennt und nach gleichem Prinzip wie die Gesamtmasse gewogen.

3.4 Nomenklatur

Insgesamt wurden so 22 Äste an 9 Bäumen untersucht. Die Datensätze der untersuchten Äste wurden von 1 bis 22 fortlaufend nummeriert. Der Ast mit der Datensatznummer 12 wurde wegen ungünstiger Asteigenschaften in der späteren Auswertung nicht betrachtet, so dass 21 Äste in der Untersuchung verblieben.

Die einzelnen 10 %-Segmente werden von außen nach innen als Seg_1 bis Seg_{10} bezeichnet. Die Segmente Seg_6 bis Seg_9 werden ebenfalls benannt, auch wenn für diese Bereiche keine Daten vor Ort erhoben wurden.

Die zur Astbasis gerichteten Endpunkte der Segmente werden ebenfalls entsprechend den Arbeitsschritten von 1 bis 10 durchnummeriert und mit S_n bezeichnet. Zusätzlich wird der Punkt S_0 für punktbezogene Aussagen vor Beginn des Astabbaus eingeführt.

3.5 Erfassung und Weiterverarbeitung der Astmerkmale

Neben den direkt am Baum gemessenen und daraus direkt abgeleiteten Werten wie Astlänge, Astwinkel, Gesamtmasse des Astes und Gesamtmasse der Blätter pro Ast wurden statistische Lagemaße (arithmetischer Mittelwert, Median) und mechanische Kennwerte wie folgt berechnet:

Wirksame Astlänge in Abhängigkeit des Astwinkels

Die wirksame Astlänge ergibt sich aus der Länge des Astes, dem Astwinkel α zur Vertikalen und dem für die Berechnung betrachteten Punkt P_0 in der Mitte der beiden Nadeln des Elastometers. Im ersten Schritt muss also aus der Gesamtlänge des Astes in Verbindung mit dem Abstand des Punktes P_0 vom Ende der verdickten Astbasis die wirksame Astlänge berechnet werden. Dies geschieht durch folgende Formel:

$$(I) \quad l_{\text{wirk}}(P_0; S_n) = l_{\text{ges}}(Ab; S_n) - (\Delta EM_{Ab} + \frac{\Delta Nad_{EM}}{2})$$

mit:

$l_{\text{wirk}}(P_0; S_n)$ = wirksame Astlänge ab Punkt P_0 bis Punkt S_n

$l_{\text{ges}}(Ab; S_n)$ = gesamte Astlänge ab verdickter Astbasis bis Punkt S_n

ΔEM_{Ab} = Abstand des Elastometers zum Ende der verdickten Astbasis

ΔNad_{EM} = Abstand zwischen der ersten und zweiten Elastometernadel

Im zweiten Schritt wird der Einfluss des Astwinkels α durch die Verwendung der Winkelfunktion in Anwendung auf die hier gegebenen Astparameter berücksichtigt:

$$(II.1) \quad \sin \alpha = \frac{l_{\text{wirk}(\alpha)}(P_0; S_n)}{l_{\text{wirk}}(P_0; S_n)}$$

daraus folgt:

$$(II.2) \quad l_{\text{wirk}(\alpha)}(P_0; S_n) = \sin \alpha \cdot l_{\text{wirk}}(P_0; S_n)$$

mit:

$l_{\text{wirk}(\alpha)}(P_0; S_n)$ = wirksame Astlänge in Abhängigkeit von α ab Punkt P_0 bis Punkt S_n

Näherungsweise Berechnung der Astmasse für Seg_6 bis Seg_{10}

Um den Verlauf der Biegemomente an der Astbasis auch für die inneren 50 % des Astes getrennt betrachten zu können, wurde deren Gesamtsegmentmasse gleichmäßig auf die Teilsegmente (Seg_6 bis Seg_{10}) aufgeteilt.

Näherungsweise Berechnung der Biegemomente an der Astbasis

Biegemomente ergeben sich aus einer Last multipliziert mit der wirksamen Hebellänge, mit der die Last am betrachteten Punkt - hier die Astbasis bei Punkt P_0 - angreift. Die Last resultiert in unserem Falle aus dem Eigengewicht des Astsegmentes multipliziert mit der Erdbeschleunigung g ($9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$), die wirksame Hebellänge entspricht der wirksamen Astlänge in Abhängigkeit von α ab der Astbasis bei P_0 bis zum Schwerpunkt des jeweiligen Astsegmentes. In diesem Modell wird

für jedes Segment eine gleich bleibende Flächenlast angenommen, so dass der Schwerpunkt eines Segments bei der Hälfte der entsprechenden Segmentlänge liegt. Konkret berechnet sich die wirksame Hebellänge also wie folgt:

$$(III) \quad hl_{\text{wirk}(\alpha)}(\text{Seg}_n) = l_{\text{wirk}(\alpha)}(P_0; S_n) + \frac{1}{2} \cdot l_{\text{wirk}(\alpha)}(S_n; S_{n-1})$$

mit:

$hl_{\text{wirk}(\alpha)}(\text{Seg}_n)$ = wirksame Hebellänge in Abhängigkeit von α bezogen auf Seg_n .

Für die Berechnung des Biegemomentes, mit dem jedes einzelne Segment an P_0 wirkt gilt demnach:

$$(IV) \quad M^E(\text{Seg}_n) = m(\text{Seg}_n) \cdot g \cdot hl_{\text{wirk}(\alpha)}(\text{Seg}_n)$$

mit:

$M^E(\text{Seg}_n)$ = Biegemoment an der Astbasis zu Seg_n

$m(\text{Seg}_n)$ = Masse von Seg_n .

Um das insgesamt an der Astbasis wirkende Biegemoment zu erhalten, werden alle einzelnen Momente der jeweils verbliebenen Segmente aufaddiert:

$$(V) \quad M^E_{\text{ges}}(P_0; S_n) = \sum_{n+1}^{10} M^E(\text{Seg}_n)$$

mit:

$M^E_{\text{ges}}(P_0; S_n)$ = insgesamt an der Astbasis wirkendes Biegemoment in Abhängigkeit der verbleibenden Astteile bis S_n .

Berechnung der Widerstandsmomente

Das Widerstandsmoment W ist nach WESSOLLY & ERB (1998) ein Maß für die geometrische Tragfähigkeit eines Bauteils unter Biegung. Die Berechnung für ovale Querschnitte erfolgt über folgende Formel (BÖGE 2003):

$$(VI) \quad W = \frac{\pi \cdot d_1^2 \cdot d_2}{32}$$

mit:

d_1 = vertikaler Durchmesser

d_2 = horizontaler Durchmesser

Berechnung der Randfaserspannung bei Biegung

Die Spannung σ in der Randfaser errechnet sich - soweit bei der Berechnung des Widerstandsmomentes der volle Durchmesser in die Berechnung eingeflossen ist - nach WESSOLLY & ERB (1998) wie folgt:

$$(VII.1) \quad \sigma = \frac{M^E}{W}$$

In Verbindung mit den bisherigen Umformungen ergibt sich:

$$(VII.2) \quad \sigma(P_0; S_n) = \frac{M^E_{ges}(P_0; S_n)}{W}$$

mit:

$\sigma(P_0; S_n)$ = Spannung in der Randfaser in Punkt P_0 in Abhängigkeit von den verbleibenden Astteilen bis Punkt S_n

4.0 Ergebnisse

Zunächst werden die maßgebenden Eingangsmerkmale der 21 untersuchten Äste zusammenfassend dargestellt. In Tabelle 1 werden der Minimalwert x_{min} , der Maximalwert x_{max} sowie Mittelwert und Median jedes Merkmals angegeben.

Tab. 1) Wichtige primäre Astmerkmale im Überblick. Mit Minimal- und Maximalwert, Durchschnitt und Median.

	x_{min}	x_{max}	\bar{x}	x_Z
Länge	3,70 m	12,80 m	8,25 m	7,90 m
Durchmesser, gemittelt	5,88 cm	23,75 cm	13,64 cm	13,25 cm
Astwinkel	60°	106°	84,67°	80°
Gesamtastmasse	11,75 kg	360,80 kg	96,84 kg	75,75 kg
Gesamtblattmasse	1,19 kg	23,25 kg	7,72 kg	5,52 kg
Wirksame Hebellänge	3,45 m	12,44 m	7,87 m	7,65 m
l/d-Verhältnis	47,86	74,10	60,94	61,04

Für alle Äste zeigte sich ein sehr deutlicher linearer Zusammenhang zwischen der Astlänge und dem Astdurchmesser (Abbildung 4). Mit zunehmender Astlänge steigt das Gesamtgewicht der Äste überproportional (Abbildung 5), der Astdurchmesser dagegen mit zunehmender Astgesamtmasse aber nur unterproportional (Abbildung 6). Mit der Astlänge und dem Astdurchmesser steigt die Blattmasse überproportional (Abbildung 7 und 8).

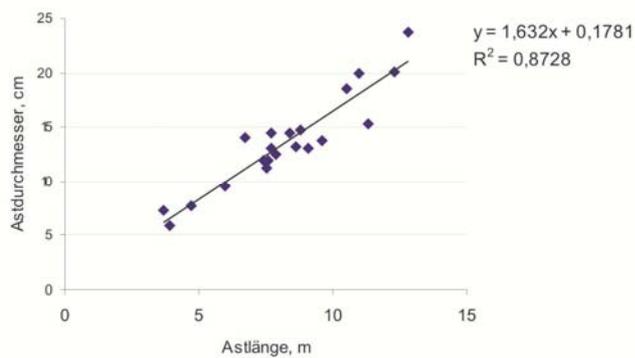


Abb. 4) Linearer Zusammenhang zwischen Astlänge und Astdurchmesser.

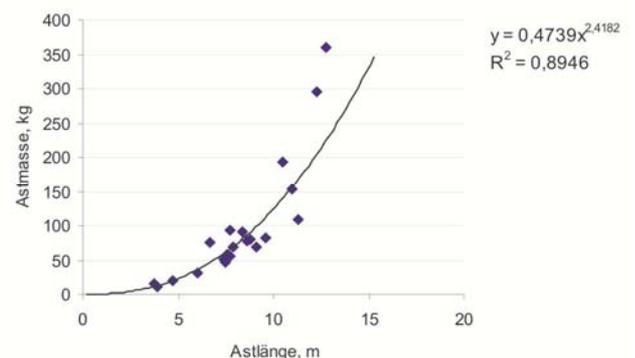


Abb. 5) Zusammenhang zwischen Astlänge und Astgesamtmgewicht. Mit zunehmender Länge nimmt die Astmasse überproportional zu.

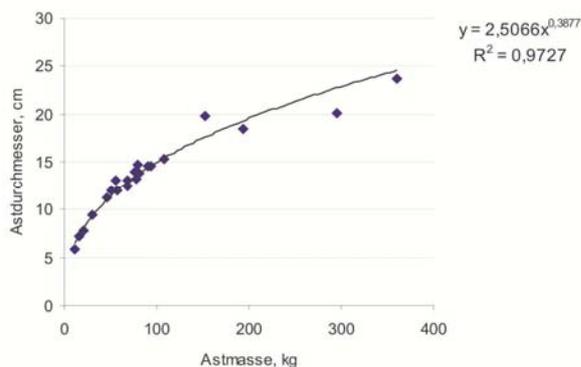


Abb. 6) Beziehung zwischen Astgesamtmasse und Astdurchmesser. Der Durchmesser nimmt mit zunehmender Astmasse nur unterproportional zu.

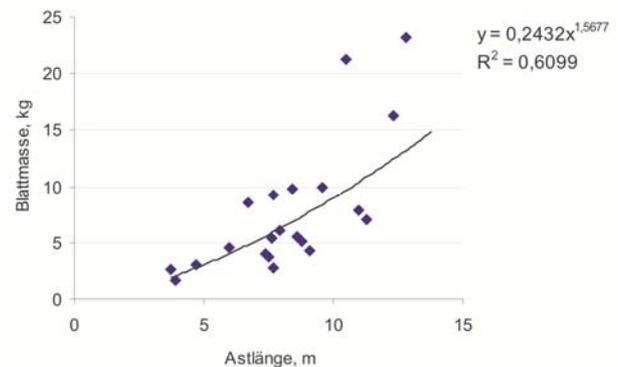


Abb. 7) Zusammenhang zwischen Astlänge und Blattmasse. Nimmt die Astlänge zu, steigt die Blattmasse überproportional.

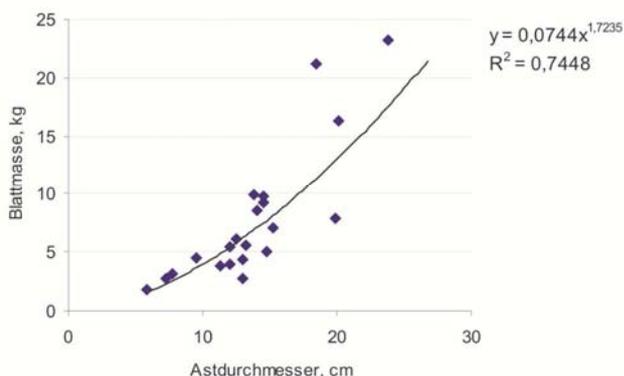


Abb. 8) Überproportional zunehmende Blattmasse bei steigendem Astdurchmesser.

Betrachtet man die Ast- und Blattmassen der entfernten Segmente relativ zur Gesamtast- bzw. -blattmasse des jeweiligen Astes, so zeigt sich in Abbildung 9, dass die Astmasse entlang der Äste von außen nach innen überproportional zunimmt und die Blattmasse für die gleiche Betrachtung unterproportional abnimmt (Abbildung 10).

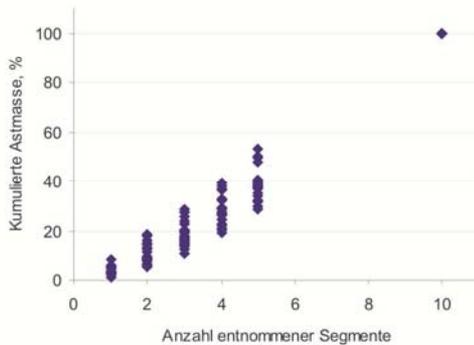


Abb. 9) Verteilung der prozentualen Astmassen auf die Segmente. Von außen nach innen steigen die Anteile überproportional.

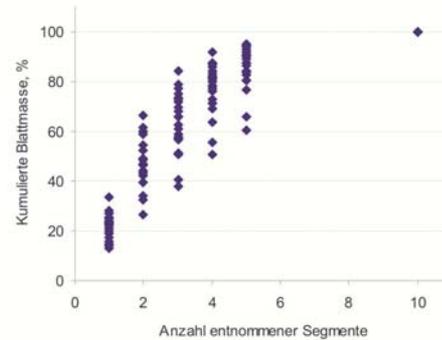


Abb. 10) Verteilung der prozentualen Blattmassenanteile auf die Segmente.

Bei gleich bleibendem Elastizitätsmodul verläuft die Dehnung proportional zur Spannung und damit auch die relative Dehnung proportional zur relativen Spannung (HOOK'sches Gesetz, z. B. in BÖGE, 2003). Die Dehnung oder Stauchung in der repräsentativen Randfaser wurde mit einem Elastometer erfasst. Die Spannung wurde, wie oben beschrieben, als Quotient aus Biegemoment und Widerstandsmoment berechnet. Da bei der hier vorgenommenen Untersuchung bezogen auf Randfaserdehnung und Biegemoment nur ein Punkt an der Astbasis des jeweiligen Astes betrachtet wird (Punkt P_0), bleiben das Elastizitätsmodul wie auch das Widerstandsmoment konstant. Abbildung 11 zeigt den linearen Zusammenhang zwischen Abnahme der Randfaserdehnung und Abnahme der Randfaserdehnung.

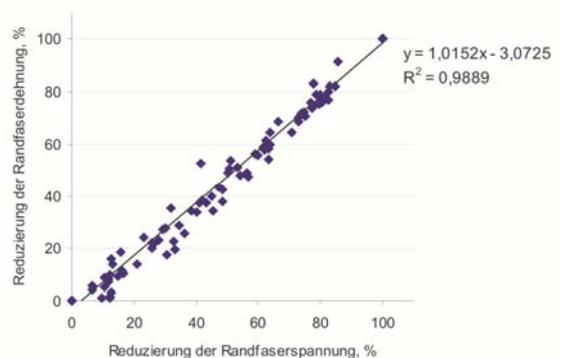


Abb. 11) Linearer Zusammenhang zwischen der relativen Abnahme der Randfaserdehnung und der relativen Abnahme der Randfaserdehnung bei Einkürzung.

Im Folgenden wurde untersucht, ob es einen Einfluss der Hauptmerkmale Astlänge und Astdurchmesser auf die Verteilung von Ast- und Blattmasse entlang der Äste gibt und ob diese Merkmale bei Einkürzung zu nachweisbaren Unterschieden in der Reduzierung des Biegemomentes in der Astbasis führen. Da das l/D -Verhältnis oft eine beträchtliche Rolle bei der Entscheidung spielt, ob und um wie viel ein Ast eingekürzt werden sollte, wurde auch sein Einfluss auf Ast- und Blattmassenverteilung sowie auf das Biegemoment bei Einkürzung überprüft.

Dazu wurden die bisher nur über den ganzen Ast, d. h. über alle Segmente gleichzeitig, betrachteten Verläufe und Verteilungen nun für jedes einzelne Segment in Verbindung mit der betreffenden Einflussgröße betrachtet. Insbesondere für das l/D-Verhältnis wurde ein Zusammenhang mit der Verteilung der prozentualen Astmassen entlang der Äste sowie der Spannung in der repräsentativen Randfaser an der Astbasis erwartet. Für einen kürzeren, an der Astbasis dickeren Ast (niedriges l/D-Verhältnis) wurde erwartet, dass ein größerer Anteil seiner prozentualen Astmasse in der Nähe seiner Astbasis liegt als bei einem längeren, an der Astbasis dünneren Ast (hohes l/D-Verhältnis).

Dabei zeigte sich, dass die Astlänge allenfalls einen geringen Einfluss auf die Verteilung der Astmasse entlang eines Astes hat. Der Anteil der beiden äußeren Segmente an der gesamten Masse eines Astes fiel geringfügig mit zunehmender Astlänge. Beispielhaft sei hier in Abbildung 12 das Diagramm für den Bezug zwischen Astlänge und Astmasse aller Äste für das Segment 2 gezeigt. Einen entsprechenden Einfluss hat die Astlänge auf die Reduzierung des Biegemomentes in der Astbasis und auf die Spannung in der Randfaser. Hier sei ebenfalls für das Segment 2 das Diagramm für diesen Bezug als Beispiel gezeigt (Abbildung 13).

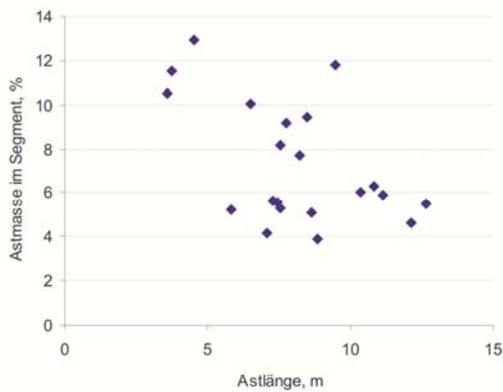


Abb. 12) Bezug zwischen Astlänge und im zweiten Segment vorhandener prozentualer Astmassenanteile aller Äste.

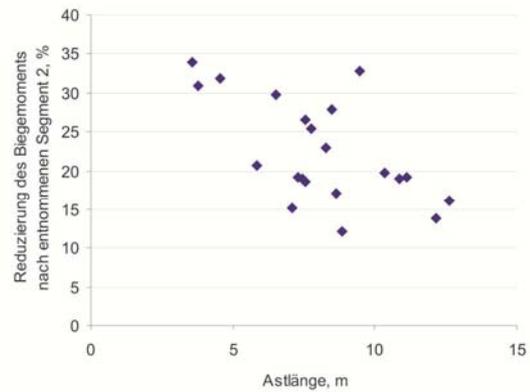


Abb. 13) Bezug zwischen Astlänge und prozentualer Reduzierung des Biegemoments aller Äste nach Entfernung des 2. Segments.

Der Astdurchmesser hatte ebenfalls keinen Einfluss auf die Verteilung der relativen Ast- oder Blattmassen auf die Segmente. Auch für die Reduzierung des Biegemomentes in der Astbasis durch die Einkürzung konnte kein Zusammenhang mit dem Astdurchmesser festgestellt werden.

Das l/D-Verhältnis jedoch hatte zumindest innerhalb des ersten Segmentes einen geringen aber hoch signifikanten ($p < 0,001$) Einfluss auf die Verteilung von Ast- und Blattmasse. Demnach befinden

sich bei gleich bleibender Astlänge und einem l/D-Verhältnis von 70 etwa $2,9 \pm 0,5$ % der Gesamtastmasse im ersten Segment. Bei einem Ast mit l/D=50 sind es etwa $4,7 \pm 0,5$ % und somit ca. 1,8 %-Punkte mehr. Für die Blattmasse liegen die Werte im gleichen Segment bei $19,3 \pm 1,5$ % für l/D=70 und bei $24,3 \pm 1,7$ % für l/D=50. In dieser Untersuchung war bei sonst vergleichbaren Ästen die Streuung der Ast- und Blattmasse innerhalb der Segmente jedoch so groß, dass der Einfluss des l/D-Verhältnisses hier vernachlässigt werden kann.

Bei segmentweiser Betrachtung zeigte sich der lineare Zusammenhang zwischen entnommener Astmasse und der daraus resultierenden Reduzierung des Biegemomentes. Beispielhaft sei in Abbildung 14 der Zusammenhang für das zweite Segment gezeigt. Das Bestimmtheitsmaß lag für kein Segment unter $R^2=0,97$. Da von *Seg*₁ zu *Seg*₁₀ die Steigung der Ausgleichsgeraden kontinuierlich abnahm, entsteht für diesen Zusammenhang bei Betrachtung des gesamten Astes eine Kurve (Abbildung 15).

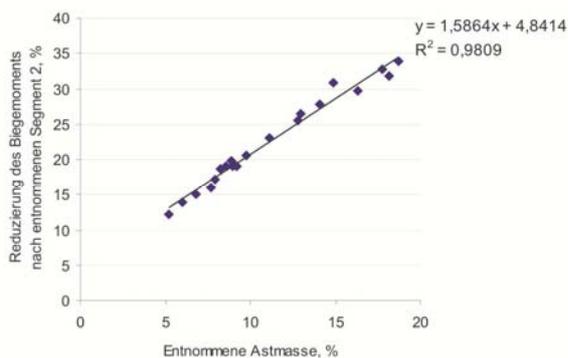


Abb. 14) Zusammenhang zwischen im 2. Segment entnommener prozentualer Astmasse aller Äste und der daraus entstehenden prozentualen Reduzierung des Biegemoments an der Astbasis.

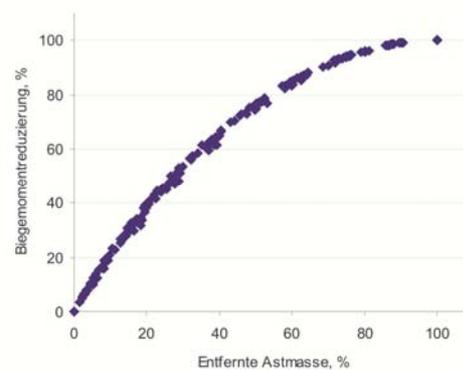


Abb. 15) Bezug zwischen prozentual entfernter Astmasse aller Äste und der daraus resultierenden prozentualen Abnahme des Biegemoments.

Abbildung 16 zeigt für die Segmente die jeweiligen Biegemomentreduzierungen, wodurch die Spanne der tatsächlichen Entlastungen an der Astbasis deutlich wird. Im ersten Segment beträgt dabei die Spanne 4 % bis 16 %, im zweiten Segment 12 % bis 34 % und im dritten Segment 23 % bis 48 %.

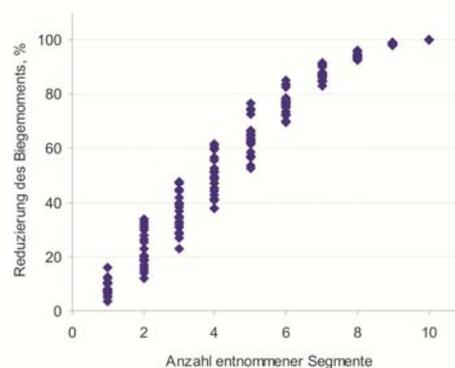


Abb. 16) Prozentuale Reduzierung der Biegemomente in der Astbasis nach Entfernung des entsprechenden Segments.

Abschließend werden die wesentlichen sekundären Astmerkmale dargestellt, die das Ergebnis der vorhergegangenen Untersuchungen sind. In Tabelle 2 werden die für die Diskussion wichtigen Mittel- und Medianwerte der Merkmale Blattmasse und Astmasse mit den jeweiligen prozentualen Segmentwerten sowie die prozentuale Biegemomententlastung in der Astbasis pro entnommenem Segment angegeben.

Tab. 2) Wichtige sekundäre Astmerkmale der Untersuchung im Überblick. Zu dem jeweiligen Merkmal werden das untersuchte Segment, der Mittelwert und der Median in Prozent angegeben.

Merkmal	Segment	\bar{x}	x_Z
Anteil an der Blattgesamtmasse	1	22 %	23 %
	2	26 %	27 %
	3	16 %	15 %
	4	13 %	13 %
	5	9 %	8 %
	6 - 10	15 %	13 %
Anteil an der Blattgesamtmasse, kumuliert	1	22 %	23 %
	2	48 %	47 %
	3	64 %	66 %
	4	76 %	78 %
	5	85 %	87 %
	6 - 10	100 %	100 %
Anteil an der Astgesamtmasse	1	4 %	3 %
	2	7 %	6 %
	3	8 %	8 %
	4	9 %	9 %
	5	11 %	11 %
	6 - 10	61 %	62 %
Anteil an der Astgesamtmasse, kumuliert	1	4 %	3 %
	2	11 %	9 %
	3	19 %	18 %
	4	28 %	27 %
	5	39 %	38 %
	6 - 10	100 %	100 %
Reduzierung des Biegemomentes an der Astbasis	1	8 %	8 %
	2	22 %	20 %
	3	36 %	35 %
	4	50 %	50 %
	5	64 %	63 %
	6	77 %	77 %
	7	87 %	87 %
	8	94 %	94 %
	9	99 %	99 %
	10	100 %	100 %

5.0 Diskussion

Die bei den 21 untersuchten Ästen festgestellten Zusammenhänge zwischen der Astlänge, dem Astdurchmesser, der Ast- und der Blattmasse sind unter anderem durch die Arbeiten von NIKLAS (1992) bekannt. Auch in der hier untersuchten Stichprobe sind die Zusammenhänge zwischen Astlänge und Astmasse überproportional und zwischen Astmasse und Astdurchmesser unterproportional. Der daraus resultierende proportionale Zusammenhang zwischen Astlänge und Astdurchmesser wird in der Formel zur Trendlinie durch einen Gradienten von 1,63 und einen Exponenten von 1 beschrieben. Damit liegt er deutlich unter dem von NIKLAS (1992) mit $D \propto l^{1,5}$ beschriebene Gradienten und entspricht dem Modell der geometrischen Selbstähnlichkeit (MCMAHON & KRONAUER 1976).

Die überproportionale Zunahme der Astmasse sowie die unterproportionale Zunahme der Blattmasse entlang der Äste sind ebenfalls nicht unerwartet. Dass bei den meisten Laubbaumarten der größte Teil der Blattmasse in den Außenbereichen des Astes und umgekehrt der überwiegende Teil der Holzmasse und damit auch der Astmasse stammnah zu finden ist, erschließt sich in der Regel schon bei Betrachtung.

In dieser Untersuchung konnte kein Einfluss des Durchmessers an der Astbasis und allenfalls ein geringer Einfluss der Astlänge auf die Verteilung von Ast- und Blattmasse entlang der Äste sowie die Reduzierung des Biegemomentes in der Astbasis bei Einkürzung gefunden werden. Beim Einfluss des l/D-Verhältnisses auf die Verteilung von Ast- und Blattmasse lag eine starke Interaktion mit der Astlänge vor. Die im Ergebnisteil angegebenen Prozentzahlen wurden bei einer Festlegung der Astlänge auf etwa 7,90 m erreicht. Das entspricht dem Medianwert für die Astlänge aller Äste der Untersuchung. Wurde die Astlänge verändert, ergaben sich deutlich andere Ergebnisse. Dies könnte auf die Ausgewogenheit des Systems Ast hinweisen: eine potentielle Überbelastung eines Astes allein durch Astwachstum entsteht unter Umständen seltener, als bisweilen angenommen. Gleichzeitig bedeutet dies für diese Untersuchung, dass die ermittelten prozentualen Durchschnittswerte von Ast- und Blattmasse der jeweiligen Segmente als repräsentativ gelten dürfen, ebenso die durchschnittlichen Werte für die Reduzierung der Biegemomente.

In der Praxis könnten diese Werte auch für andere Baumarten als Basis zur Abschätzung der prozentualen Massen- und Momentreduzierungen dienen, wobei baumartspezifische Unterschiede zu berücksichtigen wären. Ein Spitzahorn zum Beispiel dürfte spätestens in der Reifephase einen größeren Anteil seiner Blattmasse in den äußeren Astregionen unterhalten als eine Eiche.

Dass für die Astmassenverteilung und für die Randfaserspannung in der Astbasis keine Zusammenhänge mit dem l/D-Verhältnis gefunden wurden, könnte daran liegen, dass die Streuung der l/D-Werte recht gering war und keine extremen Werte im unteren oder oberen Bereich enthielt. Bei ab- und vollholzigeren als den hier gemessenen Ästen wäre zu erwarten gewesen, dass ein langer, sich langsam verjüngender Ast zumindest in den stammnahen Bereichen eine geringere prozentuale Astmasse hätte als ein kurzer, sich schnell verjüngender Ast. Dann hätte vielleicht die prozentuale Astmasse über den gesamten Ast betrachtet bei einem Ast mit hohem l/D-Verhältnis von außen nach innen weniger überproportional zugenommen.

Für die Spannung in der Randfaser, bei deren Berechnung das Biegemoment als Dividend und das Widerstandsmoment als Divisor eingeht, war ebenfalls ein deutlicherer Zusammenhang mit dem l/D-Verhältnis erwartet worden. Wird doch das l/D-Verhältnis selbst vom Dividenden Länge und dem Divisor Durchmesser gebildet. Das Biegemoment wiederum wird maßgeblich von der Hebellänge bestimmt (siehe Formel IV), das Widerstandsmoment hingegen wird durch den Durchmesser in dritter Potenz gebildet (Formel VI). MATTHECK & HÖTZEL (1997), WESSOLLY & ERB (1998) und MATTHECK (2007) geben an, dass es an Starkästen älterer Bäume zu so genannten Rindenstauchungen auf der Astunterseite in Folge statischer Überbelastung durch zu hohe Druckspannung kommen kann. Es war erwartet worden, dass sich dies auch bei einem Längenwachstum ohne gleichzeitiges Dickenwachstum (Erhöhung des Schlankheitsgrades) schon vor Eintritt der Symptome messbar in der Randfaserspannung niederschlägt.

Möglicherweise wäre eine größere Spanne zwischen minimalem und maximalem l/D-Verhältnis für diese Untersuchung besser gewesen. Dass die Spanne nur von 48 bis 74 reicht, liegt daran, dass keine weiteren Äste mit niedrigeren oder höheren l/D-Verhältnissen in einer ausreichenden Dimension (über 10 cm Durchmesser) zu finden waren. Dadurch könnte es sein, dass Bezüge zwischen dem l/D-Verhältnis und den oben genannten Parametern zwar vorhanden, aber in dieser Untersuchung nicht erkennbar sind. Unabhängig davon wurde mit einem durchschnittlichem l/D-Verhältnis von 61 deutlich in dem Bereich gearbeitet, der in der Praxis bisweilen schon als kritisch angesehen wird.

Zum Modell der Biegemomentberechnung in der Astbasis

Da es in dieser Untersuchung um die Biegemomente an der Astbasis geht, eignet sich aus Sicht der Autoren das gewählte Modell am besten. Dabei wird die Gestalt des Astes in Form von

Verzweigung und Verjüngung vernachlässigt. Stattdessen werden nur die unregelmäßig über den Ast verteilten Astmassen berücksichtigt. Zwar haben GENENZ *et al.* (1998) für Starkäste an Hybridpappeln und SPATZ *et al.* (2007) für deutlich kleinere Äste von Douglasien gezeigt, dass die Verjüngung eines Astes entlang der Astachse nahezu linear verläuft, diese Erkenntnis kann aber nach Meinung der Autoren für die Betrachtungen an einem Punkt in der Astbasis in der hier vorgenommene Untersuchung vernachlässigt werden. Sowohl GENENZ *et al.* als auch SPATZ *et al.* brachten bei ihren Untersuchungen zusätzliche, jeweils nur an einem Punkt angreifende Lasten in das System ein. Deshalb konnte in diesem Falle zwischen der Ast- und/oder Stammbasis und dem einzelnen Lastangriffspunkt eine Achse gezogen und betrachtet werden. Bei der vorliegenden Arbeit werden jedoch die schon im System vorhandenen Kräfte betrachtet. Diese verteilen sich in den äußeren Astbereichen auf eine Vielzahl von einzelnen Ästen und damit auch auf eine Vielzahl von Astachsen. Da aber für jeden Ast die Astmasse auch in den äußeren Astbereichen für jeweils ein ganzes Segment betrachtet wird, ist es nicht sinnvoll, diese Masse auf nur eine einzige sich linear verjüngende Astachse zu beziehen.

Den Autoren ist bewusst, dass die tatsächlich in den einzelnen Segmenten auftretenden Lasten nicht wie angenommen gleichmäßige Flächenlasten sind, sondern eher Trapezlasten. Diese setzen sich aus einer gleichmäßigen Flächenlast mit mittigem Schwerpunkt und einer Dreieckslast zusammen, deren Schwerpunkt in Abhängigkeit der Lasten der angrenzenden Segmente entweder bei $\frac{1}{3}$ oder bei $\frac{2}{3}$ der Flächenlänge liegt. Stichprobenartige Vergleiche der gewählten Berechnungsart mit der genaueren Berechnungsart zeigten jedoch für die äußeren fünf Astsegmente nur geringe Abweichungen in den resultierenden Biegemomenten. Dies dürfte an der polyachsialen Struktur dieser Astbereiche liegen.

Zur näherungsweisen Berechnung der Astmassen für *Seg*₆ bis *Seg*₁₀

In Abbildung 9 wurde gezeigt, dass der prozentuale Anteil der Astmasse in Bezug auf die Gesamtmasse zur Astbasis hin überproportional ansteigt. Ohne die Einzeldaten zu kennen, gilt dies sehr wahrscheinlich auch für *Seg*₆₋₁₀ bei einzelner Betrachtung der Segmente *Seg*₆ bis *Seg*₁₀. Zur Näherung kann dennoch für diese Segmente von einem linearen Anstieg der Anteile ausgegangen werden, wie Abbildung 17 verdeutlicht. Dazu wurden aus allen Ästen die Mittelwerte der Astmassen für jedes Segment gebildet und über den Segmenten aufgetragen. Trägt man jetzt die Mittelwerte der gleichmäßig auf die Segmente 6 bis 10 verteilten Massen über den zugehörigen Segmenten auf, wird ersichtlich, dass diese nur unwesentlich von der Trendlinie der anderen Daten abweichen.

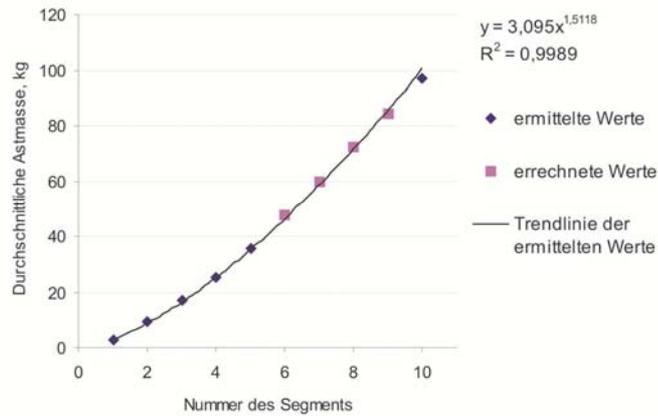


Abb. 17) Verteilung der durchschnittlichen Astmassenanteile auf die Segmente: für die Segmente 1 bis 5 und 10 sind die Durchschnitte der tatsächlich ermittelten Werte aller Äste mit Trendlinie dargestellt. Für die Segmente 6 bis 9 sind die Durchschnitte der errechneten Astmassenanteile aller Äste dargestellt.

Diskussion der Ergebnisse für die Biegemomentbetrachtung

Die Biegemomente errechnen sich aus einer Last und dem zugehörigen Hebelarm. Das bedeutet, dass sie ihren absoluten Maximalwert im Punkt der Einspannung (hier die Astbasis) haben und die Hebelarmlänge sich bei gleich bleibender Last linear auf das Biegemoment auswirkt. Entlang eines Astes treten also von innen nach außen wegen des kürzer werdenden Hebels und der geringeren einwirkenden Last immer geringere Momente auf. Kürzt man den Ast ein, wird der Hebelarm kürzer und gleichzeitig wird an den entscheidenden Stellen - außen am Hebel - die Last reduziert. Damit geht nicht nur das maximale Biegemoment in der Astbasis zurück, sondern darüber hinaus auch die lokal über den Ast verteilten Biegemomente. Diese sogar in noch größerem Umfang, weil eine auf die Gesamtlänge des Astes bezogene Einkürzung sich von innen nach außen immer stärker auf die lokal verbleibenden Hebel auswirkt.

Für die Biegemomente an der Astbasis zeigte sich, dass bestenfalls die Astlänge einen geringen Einfluss auf die Momentenreduzierung bei einer Einkürzung hat. Damit können auch hier mit ausreichender Genauigkeit und vorbehaltlich eines Signifikanztests verallgemeinernde Aussagen über die Reduzierung der Biegemomente in der Astbasis von Eichenästen dieser Dimension unabhängig von der Astlänge mit Hilfe der Segmentdurchschnitte gemacht werden (Tabelle 2).

Im Falle einer Einkürzung werden aber nicht nur die Sicherheitsreserven für eine rein statische Belastung wie z. B. Schnee erhöht. Auch gegenüber dynamischen Windbelastungen sind mehr Reserven vorhanden und dies sogar aus mehreren Gründen. Zum einen wirkt die Biegemomentreduzierung quasi wie ein Puffer. Dieser müsste dann bei Windbelastung erst

aufgebraucht werden, bis der Status quo bezüglich des Biegemomentes vor Einkürzung erreicht ist. Erst darüber hinaus würde der Ast in den Bereich einer tatsächlichen, zusätzlichen Belastung kommen. Zum anderen wird z. B. nach WESSOLLY & ERB (1998) die Windbelastung an sich entscheidend durch die Segelfläche beeinflusst, die ihrerseits hauptsächlich von der Blattoberfläche am Ast gesteuert wird. Tabelle 2 hat anhand der Durchschnittswerte deutlich gemacht, dass selbst eine Einkürzung um 10 % der Astlänge eine erhebliche Reduzierung der Blattmasse und damit der Segelfläche zur Folge hat. Zudem ist auch der Hebel um die besagten 10 % kürzer. Wind hat also weniger Segelfläche und weniger Hebelarm zur Verfügung, um den geschaffenen Puffer zu neutralisieren. Dies lässt sich auch aus den Ergebnissen von SMILEY & KANE (2006) entnehmen, die den Effekt verschiedener Schnittmaßnahmen auf die Windbelastung an kleineren, stehenden Bäumen untersuchten. Nimmt man schließlich das Model der Dämpfungskaskade von PFISTERER & SPATZ hinzu, könnte das Ergebnis einer stärkeren Einkürzung eine deutliche Veränderung des Schwingungsverhaltens des verbleibenden Astes sein. Dieser würde dann bei Windbelastung zwar mit einer geringeren Amplitude schwingen, dafür aber mit einer höheren Frequenz. Diese Systemversteifung könnte nach Ansicht von PFISTERER & SPATZ unter Umständen dazu führen, dass die verbleibende noch auf das System Ast einwirkende Windlast ungedämpft auf den Stamm übertragen wird.

6.0 Schlussfolgerungen und Bedeutung für die Baumpflege

Anhand der Ergebnisse können einige allgemeine Aussagen zu den baubiologischen und statischen Auswirkungen von Asteinkürzungen gemacht werden. Zwar ist der prozentuale Anteil der Astmasse, der bei einer Einkürzung im Außenastbereich entnommen wird, relativ gering, auf die entfernte Blattmasse und die Reduzierung des Biegemomentes in der Astbasis hat er aber deutlichen Einfluss.

Die bei einer Einkürzung entfernte Blattmasse ist entscheidend für die physiologischen Folgen des Eingriffs. Diese sollten - wenn möglich - die Obergrenze der Asteinkürzung bestimmen. Bei einer Einkürzung um 10 % werden im Durchschnitt schon über 20 % der Blätter entfernt. Wenn die äußeren 20 % eines Astes entfernt werden, sind bereits 45 % der Blattmasse verloren gegangen. Bei einer 30 %igen Reduzierung der Astlänge sind schließlich fast 65 % der Blattfläche entfernt. Dies hat zur Folge, dass sowohl der Ast selber als auch, jedenfalls bei großen Ästen, der ganze Baum deutlich schlechter mit Assimilaten versorgt werden. Besonders bei ohnehin in ihrer Vitalität eingeschränkten Bäumen sollte dies bei der Bemessung einer Einkürzung berücksichtigt werden. Auch vitale Äste sollten aus physiologischer Sicht nicht um mehr als 20 % eingekürzt werden. In

der Praxis ist es zwar derzeit üblich, in Leistungsverzeichnissen und Angeboten Einkürzungen in 10 %-Schritten zu beschreiben, denkbar wäre aber z. B. die Einführung von 5 %-Schritten.

Die zu erzielende Reduzierung des Biegemomentes sollte für das nötige Maß einer Asteinkürzung ausschlaggebend sein. Kürzt man einen Ast um 10 % seiner Länge ein, geht das maximale Biegemoment in der Astbasis durchschnittlich bereits um etwa 8 % zurück. Bei einer Einkürzung um 20 % reduziert sich das Biegemoment in der Astbasis schon um über 22 %. Bei Entfernung von 30 % der Astlänge ist das Biegemoment in der Astbasis um über 36 % gegenüber dem Ausgangswert reduziert. Von der Astbasis zur Astspitze hin nimmt bei einer Einkürzung das ohnehin schon kontinuierlich kleiner werdende lokale Biegemoment in noch größerem Umfang ab. Eine auf den gesamten Ast bezogene Reduzierung des Hebelarms wirkt sich für jeden beliebigen anderen Punkt am Ast von innen nach außen zunehmend stärker aus. Dies ist besonders interessant, wenn es um die Entlastung eines z. B. in der Mitte geschädigten Astes geht.

Nach einer Einkürzung wirkt die erzielte Entlastung wie ein Puffer. Kommt es dann zu einer Belastung z. B. durch Wind, muss zunächst das Biegemoment aufgebracht werden, um welches der Ast zuvor entlastet wurde. Erst darüber hinaus kommt es zu einer tatsächlichen zusätzlichen Belastung. Bei einer Einkürzung wird aber gleichzeitig in nicht geringem Umfang Blattmasse und damit Segelfläche entfernt. Damit kann der für eine Belastung häufig entscheidende Wind nach einer Asteinkürzung weniger Biegemoment im Ast auslösen als vor der Einkürzung. Der Puffer-Effekt erhöht sich also zusätzlich. Auch in der Vergangenheit durchgeführte Asteinkürzungen sollten bei der Erwägung einer Maßnahme berücksichtigt werden. Die durch sie erzielte Reduzierung des Biegemomentes könnte sich immer noch auf den Puffer auswirken.

Nimmt man also die Effekte der statischen Entlastung und der Reduzierung der Segelfläche zusammen, sollte auch aus statischer Sicht eine Asteinkürzung um 20 % das äußerste Maß darstellen. Ein bisher nicht eingekürzter Ast, der eine Einkürzung um 30 % und damit eine Biegemomentreduzierung um etwa 36 % gekoppelt mit der entsprechenden Reduzierung der Segelfläche benötigt, ist schwer vorstellbar. Eine Reduzierung der Astlänge um mehr als 20 % sollte daher nur extrem selten erforderlich sein. In vielen Fällen sollten aber bereits geringere Einkürzungen als 20 % den statischen Anforderungen genügen.

B. Sc. Olaf Florin
Daspelstraße 21
34128 Kassel
0561-8209487
info@olaf-florin.de

B. Sc. Olaf Florin studierte Arboristik an der HAWK in Göttingen und schrieb seine Bachelorarbeit zum vorliegenden Thema. Seit über zehn Jahren ist der gelernte Landschaftsgärtner und Fachagrarwirt für Baumpflege und Baumsanierung selbstständig. Baumpflege und Sachverständigentätigkeit sind seine beruflichen Tätigkeitsfelder.

Prof. Dr. Steffen Rust
Fakultät Ressourcenmanagement
Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst
Hildesheim - Holzminden – Göttingen
Büsgenweg 1a
37077 Göttingen
0551-5032-173
rust@hawk-hhg.de

Prof. Dr. Steffen Rust ist Professor für Baumpflege und Baumbiologie an der Hochschule für Angewandte Wissenschaft und Kunst (HAWK) in Göttingen.

Literaturverzeichnis

BÖGE, A., 2003: Technische Mechanik. 26. Auflage. Vieweg-Verlag, Braunschweig; 428 Seiten.

DEITER, A., Dipl. Ing. Landespflege, 2008: Mündliche Mitteilung. Brudi & Partner Tree Consult, ö. b. v. Sachverständiger für Baumpflege, Verkehrssicherheit von Bäumen und Baumwertermittlung.

EVERS, J.; FRANZ, C.; KÖRVER, F.; ZIEGLER, C., ca. 1998: Waldbäume: Bildserien zur Einschätzung von Kronenverlichtungen bei Waldbäumen. Verlag M. Faste, Kassel, 160 Seiten.

FINK, S., 2008 (Internet): Gutachterliche Stellungnahme zu den Angriffen von Gruber auf die von Mattheck und Mitarbeitern entwickelte VTA-Methode zur Beurteilung der Verkehrssicherheit von Einzelbäumen.

http://www.baumdiagnostik.de/AKTUELLES/PDFBibliothek/Gutachten_Mattheck_Gruber3.pdf

(Zugriff am 17.04.2009).

FLL Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V. (Hrsg.), 2006: ZTV-Baumpflege: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Baumpflege. 5. Auflage. Bonn, 71 Seiten.

GENENZ, V.; SPECK, T.; BRÜCHERT, F.; BECKER, G., 1998: Biomechanische und morphologische Analyse des Starkastbruchs bei der kanadischen Hybridpappel (*Populus x canadensis*) und die Bedeutung in der Baumpflegepraxis. Palmarum Hortus Francofurtensis **6**, Seiten 133 - 154.

GRUBER, F., 2007: VTA-Schlankheitskonstanten sind wissenschaftlich unhaltbar. ProBaum 4/2007, Seite 16 ff.

KLÖHN, N. A., 2009 (Internet): Wissenschaftliche Missverständnisse - Stellungnahme zu „VTA-Schlankheitskonstanten sind wissenschaftlich unhaltbar“ von F. Gruber in ProBaum 4/2007.

http://www.baumdiagnostik.de/AKTUELLES/PDF-Bibliothek/Stellungn_zu_Gruber_ProBaum_4-2007.pdf (Zugriff am 17.04.2009).

LONSDALE, D., 1999: Principles of tree hazard assessment and management. Forestry Commission, The Stationery Office, London; 388 Seiten.

MACMAHON, T. A.; KRONAUER, R. E., 1976: Tree structures: deducing the principles of mechanical design. J. theor. Biol. 59. 443-66.

MATTHECK, C., 2002: Mechanik am Baum. Forschungszentrum Karlsruhe GmbH; 130 Seiten.

MATTHECK, C., 2007: Aktualisierte Feldanleitung für Baumkontrollen mit Visual Tree Assessment. Forschungszentrum Karlsruhe GmbH; 170 Seiten.

MATTHECK, C.; BETHGE, K., 2008 (Internet): Bestätigung der VTA-Versagenskriterien im Vergleich. http://www.baumdiagnostik.de/AKTUELLES/PDF-Bibliothek/VTA-Versagenskriterien_im_Vergleich.pdf (Zugriff am 17.04.2009).

MATTHECK, C.; HÖTZEL, H.-J., 1997: Baumkontrolle mit VTA - Fachliche Anleitung und rechtliche Absicherung. Rombach Verlag, Freiburg im Breisgau; 187 Seiten.

NIKLAS, K. J., 1992: Plant Biomechanics - An Engineering Approach to Plant Form and Function. The University of Chicago Press, Chicago, USA; 607 Seiten.

PFISTERER, J. A., 1999: Gehölzschnitt nach den Gesetzen der Natur. Verlag Eugen Ulmer GmbH & Co, Stuttgart; 300 Seiten.

PFISTERER, J. A.; SPATZ, H.-C., 2010: Wechselbeziehungen zwischen Windlast und Schwingungsverhalten von Baumkronen – aktuelle Untersuchungsergebnisse. In: Dujesiefken, D.; (Hrsg.) 2010: Jahrbuch der Baumpflege, 14. Ausgabe. Haymarket Media GmbH & Co. KG, Braunschweig; 344 Seiten.

PIETZARKA, U., 2008: Grundlagen eines fachgerechten Gehölzschnitts. In: Roloff, A. (Hrsg.) 2008: Baumpflege. Verlag Eugen Ulmer KG, Stuttgart; 172 Seiten.

ROLOFF, A., 2001: Baumkronen: Verständnis und praktische Bedeutung eines komplexen Naturphänomens. Verlag Eugen Ulmer GmbH & Co, Stuttgart; 164 Seiten.

SIEWNIAK, M.; KUSCHE, D., 1984: Baumpflege Heute. 1. Auflage. Patzer Verlag GmbH & Co. KG, Berlin; 295 Seiten.

SMILEY, E. T.; KANE, B., 2006: The effects of pruning type on wind loading of *Acer rubrum*. *Arboriculture & Urban Forestry* 32(1): January 2006, Seite 33 ff.

SPATZ, H.-C.; BRÜCHERT, F.; PFISTERER, J. A., 2007: Wie reagieren Bäume auf dynamische Windlasten oder wie können Bäume einer Resonanzkatastrophe entgehen? In: Dujesiefken, D.; Kockerbeck, P. (Hrsg.) 2007: *Jahrbuch der Baumpflege*, 11. Ausgabe. Haymarket Media GmbH & Co. KG, Braunschweig; 367 Seiten.

UMWELTBUNDESAMT 2007 (Internet): Umweltbeobachtung in Deutschland - Waldzustandserhebung. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
<http://www.umweltbundesamt.de/umweltbeobachtung/uid/forests/waldzustandserhebung.htm>
(Zugriff am 22.03.2009).

VON MALEK, J.; MOLITOR, W.; PEBLER, K.; WAWRIK, H., 1999: *Der Baumpfleger*. Verlag Eugen Ulmer GmbH & Co, Stuttgart; 569 Seiten.

WESSOLLY, L.; ERB, M. 1998: *Handbuch der Baumstatik und Baumkontrolle*. Patzer Verlag, Berlin; 270 Seite