

Grundlagen und Kriterien zur visuellen Beurteilung der Standsicherheit von Bäumen

Basics and criteria for visual judgement of the stability of trees

von Andreas Detter und Steffen Rust

Zusammenfassung

Wurzelsysteme bilden komplexe unterirdische Strukturen, über die ein großer Teil der mechanischen Windlast in den Boden abgeleitet werden muss. Unterirdische Schäden an statisch wirksamen Wurzeln sind bei visuellen Kontrollen nicht direkt erkennbar. Daher bestehen insbesondere bei städtischen Bäumen erhebliche Unsicherheiten bei der Beurteilung der Standsicherheit im Rahmen der Regelkontrolle. Biomechanische Untersuchungen können die Vorgänge beim Kippsversagen beschreiben. Zusammen mit den biologischen Erkenntnissen über die Kompensationsfähigkeit lebender Bäume lassen sich daraus Merkmale standsicherer Bäume und Anzeichen für konkrete Gefährdungen ableiten. Der vorliegende Beitrag liefert Anregungen für eine angemessene Vorgehensweise bei der visuellen Kontrolle der Standsicherheit von Bäumen. Mit Beispielen wird gezeigt, wie sich die Hinweise auf frühere Eingriffe in den Wurzelbereich, ein Schrägstand oder Veränderungen im Baumumfeld zu Anzeichen einer Umsturzgefahr im konkreten Fall erhärten können bzw. wie sich ein solcher Verdacht anhand baumeigener Reaktionen in vielen Fällen ausräumen lässt.

Summary

Root systems are complex subterranean structures, which direct a major part of the wind load to the ground. Below-ground damages to structural roots are not visible during a basic tree assessment. Therefore considerable uncertainties exist with regard to tree inspection especially on urban sites. Biomechanical studies have described the process of tipping and uprooting. Biological insights help to assess the ability of living trees to compensate for defects. In combination, this allows for a definition of essential characteristics of stable trees as well as indicators of actual danger of uprooting failures. The present paper provides suggestions for adequate procedures when inspecting trees visually for stability. As examples, we suggest that clues to previous construction work in the root zone, stem lean or structural changes of the tree site only indicate greater likelihood of uprooting failure if additional features emerge during inspection. On the other hand, we demonstrate how the tree's biological response may often dispel such suspicion.

1 Einleitung

Das Entwurzeln ist eine der häufigsten Versagensformen von Bäumen und verursacht vielfach besonders große Schäden. Hinweise auf eine konkrete Umsturzgefahr, die sich im Boden oder unter Belagsflächen befinden, sind bei einer visuellen Kontrolle nicht direkt zu er-

kennen. Selbst wenn Schäden oder Mängel aufgedeckt werden, sind die Kriterien für eine Abgrenzung zwischen stabilen und nicht ausreichend belastbaren Wurzelsystemen nicht eindeutig definiert.

Verankerungswurzeln bilden komplexe unterirdische Strukturen, über die äußere mechanische Einwirkun-

gen auf den Baum zum größten Teil in den Boden abgeleitet werden müssen. Insbesondere die Verbindung mit dem Boden sorgt beispielsweise aufgrund seiner komplexen Mechanik und veränderlichen Eigenschaften (z. B. unter Einfluss der Bodenfeuchte und Lagerungsdichte) für schwer abwägbare Einflüsse auf die Standsicherheit. Es ist daher nicht verwunderlich, dass derzeit verschiedene Modelle diskutiert und teils widersprüchliche Regeln für die Beurteilung der Standsicherheit verwendet werden.

Ob es möglich ist, die Standsicherheit bei einer visuellen Baumkontrolle ausreichend zu beurteilen, hängt vom Einzelfall ab. Vielfach ist eine eingehende Untersuchung erforderlich, um eine abschließende Beurteilung der Standsicherheit zu ermöglichen. Dieser Beitrag zeigt anhand der biomechanischen Grundlagen des Kippvorgangs, der Ergebnisse wissenschaftlicher Studien und erfahrungsbasierter Kenntnisse zumindest einige Kriterien für die visuelle Kontrolle der Standsicherheit auf.

2 Biomechanische Modelle

Erkenntnisse zur Verankerung von Bäumen im Boden wurden seit den 1980er Jahren vor allem im Rahmen forstwissenschaftlicher Forschungsprojekte gewonnen. Dabei wurden zum einen Untersuchungen an entwurzelteten und zum anderen Experimente an stehenden Bäumen durchgeführt. Wesentliche Feststellungen zum Kippvorgang wurden dabei bis heute von verschiedenen Autoren immer wieder bestätigt. Zwei Modelle des Kippversagens, die aus solchen Erkenntnissen abgeleitet wurden, haben in Deutschland den größten Einfluss auf die visuelle Beurteilung der Standsicherheit.

Beobachtungen an geworfenen Wurzeltellern (WEBER & MATTHECK 2005) und einfache geometrische Analogien zur Kraftübertragung (MATTHECK et al. 2014) führten zu einem Modell, das dem Kippvorgang einen bodenmechanischen Mechanismus zugrunde legt. Eine Halbschale aus durchwurzeltem Boden dreht sich um eine Achse an der Stammbasis, wobei die Scherfestigkeit des Bodens und die Wurzeln als blockierende Elemente dieser Drehung entgegenwirken. Der Abstand zum Stamm, in dem die Bodenschichten aufeinander gleiten, kann nach einer Formel errechnet werden, die

aus dem Durchmesser der aufgeworfenen Wurzelplatte und dem Stammdurchmesser abgeleitet wurde. Die empirische Grundlage dieser Formel zeigt eine weite Streuung, so dass sie nur eine vereinfachte Näherung darstellen kann.

Nach dem zweiten Modell (WESSOLLY & ERB 2014) beruht der Kippvorgang auf einer S-förmigen Verformung der stammnahen Wurzeln, wobei der Krümmungsgrad bei steigender Belastung zunimmt und der wirksame Hebelarm sich zwischen den beiden gegenläufigen Krümmungen verkürzt. Dadurch nimmt die Kraft, die zum Kippen des Baumes erforderlich ist, immer weiter ab, je stärker der Baum bereits geneigt ist. Ab einem maximalen Rotationswinkel von $2,5^\circ$ lässt sich die einwirkende Kraft nicht mehr erhöhen und der Baum entwurzelt bei zunächst gleichbleibender, dann nachlassender Einwirkung.

Das erste Modell benutzt das endgültige Versagen der Wurzeln auf der windzugewandten Luvseite als Maßstab für den mechanisch genutzten Wurzelsteller. Das zweite Modell leitet den sog. statisch wirksamen Wurzelraum aus der Verformung ab, die das stammnahe Wurzelsystem erfährt, während es seine maximale Widerstandskraft erreicht. Aus diesen verschiedenen Betrachtungswinkeln erwachsen unterschiedliche Kriterien für die Auswirkung von Schäden auf die Standsicherheit. Die Folgerungen aus dem ersten Modell werden in der Fachliteratur durchaus kritisch beurteilt (VANOMSEN 2006; GRUBER 2007a). Für das zweite Modell wurden in praktischen Versuchen zwar grundsätzliche Bestätigungen erbracht (z. B. LUNDSTRÖM et al. 2007), teils wurden in bestimmten Situationen aber auch Abweichungen dokumentiert (z. B. BADER 2000; BREHM 2013; DETTER & RUST 2013).

Beide Modelle sind zweidimensionale Vereinfachungen von Wurzelsystemen. Sonderformen (wie die Pfahlwurzel) oder die Funktion von besonderen Organen (z. B. Senkerwurzeln) werden zunächst ausgeblendet oder abweichend behandelt. Dreidimensionale Ansätze finden sich beispielsweise bei SINN (1985), der in Analogie zu Gebäudefundamenten das Gewicht und die Maße der Wurzelplatte zur Bemessung nutzt. In den letzten Jahren wurden zudem rechnerische Modelle entwickelt mit dem Ziel, die Grundlagen der Bodenmechanik mit Erkenntnissen aus Feldversuchen in

Einklang zu bringen (z. B. DUPUY et al. 2007; RAHARDJO et al. 2013). Experimente, bei denen Verformungen der Geländeoberfläche und der Randfasern in stammnahen Wurzeln während des Kippens dreidimensional mit optischen Verfahren visualisiert wurden, wurden nicht weiterverfolgt (WATSON 2012).

Für den vorliegenden Beitrag haben wir zur Herleitung von visuellen Beurteilungskriterien für die Standsicherheit nachfolgende Beschreibung des mechanischen Versagens der Verankerung im Boden zusammengestellt, die unsere Erkenntnisse im Zuge von Studien zur Zugversuchsmethode abbildet. Sie kann zwar nicht als endgültig abgesichert gelten, entspricht nach unserem Verständnis jedoch dem Stand der biomechanischen Forschung. Ein Überblick über die Ergebnisse wichtiger wissenschaftlicher Studien zu diesem Thema findet sich bei DAHLE et al. (2017).

Mehrere Autoren bestätigen, dass es sich beim Entwurzeln nicht um einen einzigen kontinuierlichen Versagensmechanismus handelt, sondern dass verschiedene Elemente in unterschiedlichen Phasen des Kippvorgangs einen unterschiedlichen Beitrag zur Veranke-

rungskraft leisten (COUTTS 1983; BLACKWELL et al. 1990; NIELSEN 1990) und ein mehrstufiges progressives Versagen stattfindet (O’SULLIVAN & RITCHIE 1993). Durchgängig wurde festgestellt, dass bereits vergleichsweise früh im Kippvorgang, meist zwischen 2 und 5° Stammfußneigung, die maximale Widerstandskraft des Wurzelsystems erreicht und überwunden wird (z. B. COUTTS 1983; WESSOLLY 1996; ENGLAND et al. 2000; JONSSON et al. 2006; VANOMSEN 2006; LUNDSTRÖM et al. 2007).

Die Mechanismen am Beginn des Kippvorgangs, d. h. bis zum Erreichen dieses maximalen Widerstandes, sind bislang wenig untersucht. Nach unserem Verständnis bildet in dieser Phase bei ausgereiften Bäumen das verholzte stammnahe Wurzelsystem eine in sich steife Struktur. Diese Steifigkeit geht maßgeblich von stammnahen Wurzeln großen Durchmessers aus, die einen enormen Widerstand gegen die Verformung ausüben. Der umgebende Boden kann den Kippvorgang in dieser Phase aufgrund seiner viel geringeren Steifigkeit kaum behindern. Er bildet vor allem den Untergrund, um Druckkräfte aufzunehmen, die sich auf eine große Oberfläche verteilen, so dass die lokalen Druckspannungen relativ gering sind.

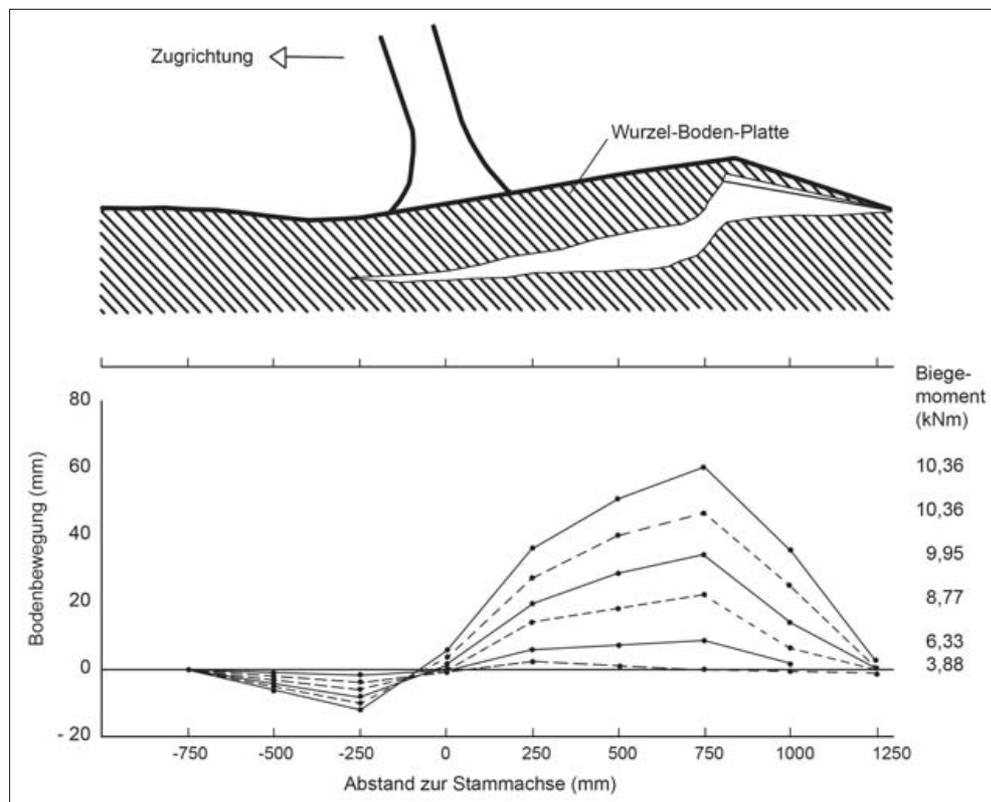


Abbildung 1: Verformung der Wurzelplatte bis zur max. Widerstandskraft nach COUTTS (1983), überhöht durch asymmetrische Achsenskalierung

Hebungen des Bodens können unter Zugbelastung viel leichter einsetzen, da die meisten Bodenarten zwar schwer komprimierbar sind, aber kaum Zugkräfte aufnehmen können. Mit steigender Last werden daher die Wurzeln auf der windzugewandten Luvseite angehoben und die Bodenmatrix reißt auf. Weil die Wurzeln auf diese Weise nach oben ausweichen können, reichen geringe Kräfte aus, um die Zugwurzeln wie eine gespannte Wäscheleine über große Länge etwas anzuheben. Viel mehr Kraft erfordert es, eine Wurzel auf kurze Distanz abzuknicken. Dieses Bild verdeutlicht die Vorgänge zu Beginn der Einwirkung einer Böe auf der windzu- und der windabgewandten Seite, das einige Autoren sehr ähnlich zeichnen (Abbildung 1).

Das Abknicken der stammnahen Wurzeln auf der windabgewandten Leeseite stellt nach unserem Verständnis ein wesentliches Hindernis dar, das überwunden werden muss, um die Neigung am Beginn des Kippvorgangs zu vergrößern. Während die lokalen Zugspannungen auf der windzugewandten Luvseite zunächst vergleichsweise gering bleiben, treten auf der Druckseite, im Übergang zwischen Stamm und Wurzel, die größten Stauchungen der Randfasern auf (STOKES 1999). Bei Überlastung können sich oberseitig lokale Faserknickzonen bilden (ähnlich wie bei dem Primärversagen des Stammes, vgl. DETTER et al. 2015) bilden, sodass die stammnahen Wurzeln sukzessive ihre Widerstandskraft verlieren und eine stärkere Neigungsreaktion des Stammfußes ermöglichen (Abbildung 2).

Erst aufgrund der zunehmenden Hebung der windzugewandten Luvseite können sich große Zugspannungen

in den dort verlaufenden Wurzeln aufbauen. Diese versagen daher auch erst lange nachdem die maximale Widerstandskraft des Wurzelsystems überwunden wurde (COUTTS 1983). Wenn diese sog. Zugwurzeln sich aus der Bodenmatrix heben und nacheinander abreißen, seilt sich der Baum sukzessive ab (Abbildung 3). In dieser Phase sind die Zugwurzeln ausschlaggebend für die Resttragfähigkeit des Wurzelsystems (WESSOLLY & ERB 2014). Nach dem Versagen steht dadurch auf der windzugewandten Luvseite ein großer Teil des Wurzeltellers aus dem Boden, an dessen Rand die Wurzeln abgerissen sind.

Demgegenüber bildet sich auf der windabgewandten Leeseite eine stammnahe Knickzone (*leeward hinge*, zu deutsch etwa „leeseitiges Scharnier“), in der die Wurzeln auf kurze Distanz abgebrochen sind. An dieser Stelle sind Faserstauchungen auf der Oberseite der Wurzel und Querrisse auf ihrer Unterseite zu beobachten (CROOK & ENNOS 1996). Die Materialeigenschaften von Wurzelholz, die sich erheblich von denen des oberirdischen Holzes unterscheiden (STOKES & MATTHECK 1996), tragen dazu bei, dass bereits bei vergleichsweise geringen Knickwinkeln ein endgültiger Bruch einsetzt. Biegt man eine lebende Wurzel und einen grünen Ast gleichen Durchmessers bis zum Versagen, lässt der Ast in der Regel vor dem endgültigen Bruch eine viel größere Verformung zu, während die Wurzel wesentlich früher abknickt.

Sind die stammnahen Wurzeln auf der Lee- bzw. Druckseite geknickt, sinkt dieser Bereich in den Boden ein (LUNDSTRÖM et al. 2007). Die dort ansetzenden Wur-



Abbildung 2: Abgeknickte stammnahe Wurzel an Platane

zeln werden nun ebenfalls durch Zugkräfte beansprucht und können abreißen. Beim entwurzelten Baum befinden sich diese Teile unter dem Stamm und entziehen sich dadurch der direkten Beobachtung. Möglicherweise hat dieser Umstand den Fokus auf die frei zugänglichen, eindrucksvoll versagenden Zugwurzeln der windzugewandten Luvseite gelenkt und zu einer gewissen Überbewertung ihrer Funktion geführt.

Zusammenfassend lässt sich der Mechanismus des Kippens in drei Phasen darstellen:

1. Aufgrund der Biegesteifigkeit des Wurzelsystems und der Druckbelastbarkeit des Untergrundes senkt sich der stammnahe Bereich der windabgewandten Wurzeln kaum ab, auf der windzugewandten Luvseite treten in den Zugwurzeln aber bereits leichte Hebungen auf.
2. Der Stammfuß rotiert um eine stammnahe Knickzone auf der windabgewandten Leeseite, bis die Biegefestigkeit der Wurzeln im Übergang zum Stammfuß überwunden wird und diese abknicken. Auf der windzugewandten Luvseite reißt der Boden im sich hebenden Wurzelteller auf. In dieser Phase wird die maximale Widerstandskraft des Wurzelsystems überwunden, sodass eine abnehmende Belastung zur Fortsetzung des Kippvorgangs genügt (Abbildung 4).
3. Die stammnahen Wurzeln auf der windabgewandten Leeseite leisten kaum noch Widerstand gegen die zunehmende Neigung. Die Rotationsachse wandert in Richtung der Mitte des Stammfußes, während seine Leeseite einsinkt. Die windzugewandten



Abbildung 3: Zugwurzeln seilen den Baum ab.

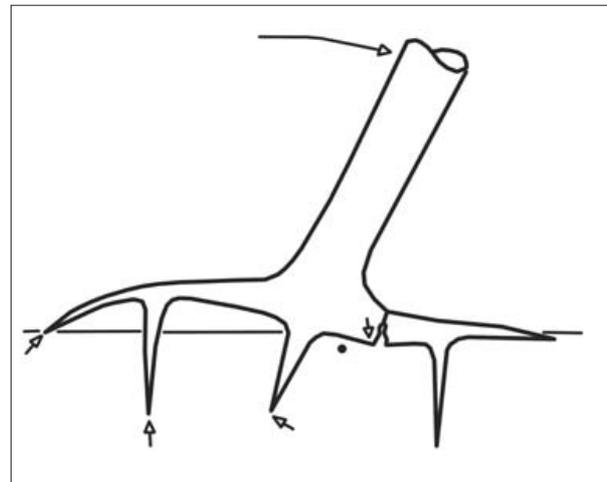


Abbildung 4: Versagensmodell nach CROOK & ENNOS (1996)

Zugwurzeln lösen sich seilartig aus dem Boden und reißen, bis der Baum schließlich kippt.

Von diesen drei Phasen können je nach Bodenart und der individuellen Ausbildung des Wurzelsystems Übergänge und Abwandlungen auftreten. So spielen tiefreichende Wurzeln oder Pfahlwurzeln, die vor allem auf Biegung belastet werden, eine wichtige Rolle; Senkerwurzeln können die Belastbarkeit der Zugseite deutlich erhöhen. Diese Wurzeln beeinflussen den beschriebenen Ablauf des Kippvorgangs aber nicht maßgeblich. Dynamische Belastungen durch eine Abfolge von Windböen können die Standsicherheit auf bestimmten Böden beeinflussen (O’SULLIVAN & RITCHIE 1993). Ansteigende zyklische Einwirkungen verursachen zwar ein progressives Versagen der Verankerung, das Entwurzeln verläuft aber nicht anders als bei einer einmaligen statischen Belastung (MORBACH 2015).

Im Ergebnis lassen sich aus den beschriebenen Mechanismen folgende oberirdisch erkennbaren Merkmale für eine hohe Verankerungskraft ableiten:

- großer Durchmesser der Stammbasis
- verbreiterte kräftige Wurzelanläufe

Anschaulich werden diese Merkmale am sog. Eiffelturm-Prinzip: die Verbreiterung der tragenden Struktur nach unten im Übergang zu den weit auslaufenden Stützen (vgl. JAHN 2005; WESSOLLY & ERB 2014). Hier wird ein biomechanischer Idealzustand beschrieben,



Abbildung 5: Verbreiterte Wurzelplatte an Platane

der aber nicht schablonenhaft angewendet werden sollte. Jeder Beobachter kann sich der Vielfalt in der natürlichen Formfindung bewusst werden, die zwar einem ähnlichen Grundmuster folgt, deren konkrete Ausgestaltung aber sehr unterschiedlich sein kann. Die Anpassung der natürlichen Struktur pflanzlicher Organismen an ihre Umwelt wurde seit DELPINO (1867) vielfach beschrieben. Die Unterschiedlichkeit der Umweltbedingungen führt zu einer Vielzahl individuell optimierter Wurzelsysteme, die alle eine ausreichende Verankerung im Boden ermöglichen.

Bei der Baumkontrolle sollte eine Abweichung vom idealen Muster also zwar Anlass zu genauem Hinsehen geben, um die Ursache für die Auffälligkeiten zu ergründen. Aber oft lässt sich der Verdacht mangelnder Standsicherheit im konkreten Fall ausräumen, weil abweichende Anpassungen des Wurzelsystems an Einschränkungen seines Standortes oder an andere individuelle Gegebenheiten zu erkennen sind.

3 Visuelle Beurteilung von Defektsymptomen

Abweichungen von einer Idealform der Baumgestalt stellen bei der Baumkontrolle also in dieser Hinsicht verdächtige Umstände dar. Als Anzeichen einer konkreten Gefahr, die im rechtlichen Sinne Handlungsbedarf auslösen würde (vgl. FLL 2010), reichen sie jedoch nicht aus. Hierfür müssen weitere Merkmale vorliegen,

durch die sich der ursprüngliche Verdacht zu konkreten Anzeichen erhärtet und letztlich eine Gefährdung vorhersehbar wird. Ebenso kann ein Anfangsverdacht oft durch visuell erkennbare Symptome einer erfolgreichen Kompensation der Mängel ausgeräumt werden.

Deswegen sind die in den FLL-Baumkontrollrichtlinien genannten Parameter und Defektsymptome bei der Beurteilung der Standsicherheit schwer anwendbar. Die Richtlinien enthalten zwar eine Auflistung eventuell verdächtiger Umstände, liefern aber keine Beurteilungskriterien für das Vorliegen einer konkreten Gefahr. Die Klärung der Frage, unter welchen Umständen Handlungsbedarf besteht, z. B. wenn Schäden an Verankerungswurzeln vorliegen, ist auch nicht die Aufgabe einer Richtlinie, sondern wäre typischerweise der Gegenstand eines Lehrbuchs.

Einzelne Verdachtsmomente liegen bei Stadt- und Straßenbäumen nahezu immer vor (POMMELITZ 2016). Daher sind Baumkontrolleure hier gezwungen, anhand der Kombination mehrerer Defektsymptome die Anzeichen einer konkreten Gefahr zu erkennen bzw. die Verdachtsmomente zu entkräften. Gerade im Hinblick auf die Standsicherheit genügt es also nicht, nur einzelne Defektsymptome zu notieren, sondern sie müssen in ihrem Zusammenwirken beurteilt werden.

3.1 Stammfußverbreiterung, Pilzbefall

Die Baumkontrollrichtlinien listen unter anderem die Stammfußverbreiterung als Merkmal einer verminderten Standsicherheit auf. Tatsächlich können durch eine solche Verdickung ausgedehnte Stockfäulen angezeigt werden. Dem oben Gesagten zufolge stellt die Verbreiterung der Stammbasis aber zugleich eine Anpassung dar, die die Standsicherheit erhöht (Abbildung 5). Daher müssen Kontrolleure in einem solchen Fall anhand weiterer Merkmale beurteilen, ob die Tragfähigkeit aktuell noch ausreichend hoch ist. An diesem Beispiel wird deutlich, dass eine Unterscheidung zwischen verdächtigen Umständen und den Anzeichen konkreter Gefahr erforderlich ist.

Die Verbreiterung weist analog zur baumstatischen Grundsicherheit (WESSOLLY 1995) auf hohe Sicherheitsreserven hin. Durch eine hohe Ausgangssicher-

heit werden Mängel gewissermaßen vorkompensiert, weil die Verankerungskraft die tatsächlich zu erwartenden Einwirkungen durch Wind- oder Schneelasten um ein Vielfaches übersteigt. Beschädigungen würden die Reserven zwar reduzieren, aber nicht direkt eine Umsturzgefahr verursachen. Ist es holzzerstörenden Pilzen aber z. B. wegen rascher Abbautätigkeit, schlechter Abschottung und sehr geringem Holzwachses gelungen, die tragende Struktur bis auf sehr dünne Schalen abzubauen oder stark aufzulösen, kann die Standsicherheit trotz der Verbreiterung des Stammfußes gefährdet sein. Als Hinweise hierfür nennt die Fachliteratur beispielsweise ausgeprägten Hohlklang, Rindenschäden oder fehlenden Zuwachs in tragenden Bereichen, Pilzfruchtkörper und andere Anzeichen für Fäulnis (austretendes Bohrmehl oder Mulm, Insekten, Flüssigkeitsaustritt) sowie die fehlende oder bereits überwundene Abgrenzung von Beschädigungen (z. B. DUJESIEFKEN et al. 2005).

Demgegenüber kann angesichts einer Stammfußverbreiterung der Verdacht der verminderten Standsicherheit ausgeräumt werden, wenn solche gefahrerhöhenden Faktoren nicht vorliegen, Schäden lokal begrenzt und engräumig durch wüchsiges Wundholz umschlossen sind. Dann kann davon ausgegangen werden, dass eine erfolgreiche Anpassung der Wuchsform an hohe Belastungen oder an Schäden wie z. B. Fäulnis in zentralen Bereichen des Stammfußes bzw. den Wurzeln vorliegt (JAHN 2005).

Bei dieser Betrachtungsweise erhält die Vitalität des Baumes eine besondere Bedeutung für die Beurteilung. Sie bestimmt maßgeblich, ob erfolgreiche Abschottung und ausreichender Zuwachs dem Voranschreiten des Holzabbaus durch Pilze, wie z. B. den Riesenporling (*Meripilus giganteus*), entgegenwirken können. Ansonsten würde sich das Gleichgewicht zwischen Abbau und Zuwachs rasch zu Ungunsten des Baumes und seiner Standsicherheit verschieben (REINARTZ & SCHLAG 2006).

3.2 Strukturelle Entwicklungsmängel

Bäume, deren Stamm parallel in den Boden eintaucht, verfügen in der Regel über geringere Traglastreserven. Daher könnten sich Beschädigungen im Wurzelbereich gravierender auf ihre Standsicherheit auswir-

ken. Liegen Hinweise auf gefahrerhöhende Umstände vor, wäre ungleich früher von einer konkreten Umsturzgefahr auszugehen. Allerdings dürfen hier morphologische Besonderheiten nicht übersehen werden, da z. B. die Gattungen *Pinus* oder *Aesculus* generell seltener verstärkte Wurzelanläufe bilden.

Hinweise auf eine unzureichende Entwicklung der Verankerungswurzeln sind bei der Kontrolle oft erkennbar. Das Ausbleiben einer Verbreiterung des Stammfußes kann unter anderem auf Würgewurzeln zurückzuführen sein, die den Stammfuß so stark umschlingen, dass das Dickenwachstum unterdrückt wird. Im Extremfall wird auch die eingeschlossene Rinde geschädigt oder stirbt ab, so dass zudem Eintrittspforten für holzzerstrende Pilze entstehen (Abbildung 6).

In solchen Fällen können die betroffenen Bäume bei ausreichendem Regenerationsvermögen oberflächennah adventive Wurzeln ausbilden, um die Krone zu versorgen. Diese verlaufen oft oberhalb der würgenden Wurzel, bilden in manchen Fällen kleine Wurzelanläufe aus und verschleiern so die strukturellen Mängel. Das Gleiche gilt für Wurzelschäden, die infolge von Übersättigungen entstehen. Auch hier dienen adventive



Abbildung 6: Würgewurzel



Abbildung 7: Adventive Wurzeln nach Kippversagen

Wurzeln als Hinweis auf versteckte Schäden, die die Standsicherheit beeinträchtigen können (Abbildung 7).

Daher sollten Würgewurzeln und insbesondere stark wachsende Adventivwurzeln grundsätzlich als Defektsymptome interpretiert werden, die Anlass zu genaueren Beobachtungen bieten, um eventuell Rückschlüsse auf die Ursache der Fehlentwicklung zu erlangen. Sobald weitere Verdachtsmomente, wie z. B. Schäden an der Rinde, Überschüttungen, Pilzfruchtkörper oder ein Einbruch der Wuchskraft, hinzukommen und sich so der Verdacht auf eine erhöhte Umsturzgefahr erhärtet, wären vorbeugende Sicherungsmaßnahmen oder eine eingehende Untersuchung erforderlich.

3.3 Eingriffe in den Wurzelbereich

Werden durch einen Verstoß gegen die Vorgaben der DIN 18 920 Wurzeln beschädigt, sollte in jedem Fall vorsorglich eine eingehende Untersuchung durch Sachverständige veranlasst werden. Die Kosten hierfür sind Teil des Schadens und somit Sache des Verursachers. Die Frage, ob eine gerätegestützte Untersuchung erforderlich ist, muss dann nicht vom zuständigen Baumkontrolleur beantwortet werden. Liegen genehmigte Eingriffe vor, ist dies nicht ganz so einfach zu regeln. Hier stellt sich die Frage, ob ein Baum sinnvoll erhalten werden kann und wann die Standsicherheit eventuell mit hohem Aufwand eingehend untersucht werden muss. Unterlässt der Baumeigentümer in einem

solchen Fall zusätzliche Kontrollen im Rahmen der Bauausführung, kann dies eine Haftung im Schadensfall begründen (FLL 2010; OLG Düsseldorf 2007).

In der Praxis sind Schäden an Verankerungswurzeln oft nicht eindeutig auszuschließen, weil die Bauarbeiten zum Zeitpunkt der Kontrolle bereits abgeschlossen sind oder nur unklare Hinweise auf Abgrabungen gefunden werden. Gerade bei Stadtbäumen sind solche verdächtigen Umstände sehr häufig (POMMELITZ 2016). Die Baumkontrollrichtlinien listen Baugruben/-gräben und Bodenauftrag/-abtrag auf, aber vielfach äußert sich die frühere Bautätigkeit z. B. nur noch in veränderten Belagsflächen oder neuen Einbauten wie z. B. Kanten- oder Leistensteinen.

3.3.1 Akute Gefährdung bei stammnahen Eingriffen

Nach verbreiteter Auffassung ist die Verminderung der Verankerungskraft vom Abstand der Grabungen zum Stamm abhängig. Nur in zwei wissenschaftlichen Versuchsreihen wurde bei Eingriffen außerhalb des statisch wirksamen Wurzelraumes (Abstand über 1,5-facher Stammdurchmesser nach WESSOLLY & ERB 2014) eine signifikante Verminderung der Standsicherheit gemessen (SMILEY 2008; FINI et al. 2012). Ansonsten war bislang keine statistisch signifikante Reduktion der Belastbarkeit des Wurzelsystems erkennbar, wenn der Abstand der Grabung mehr als das Doppelte des Stammdurchmessers betrug (Ghani et al. 2009; SMILEY 2012). Da diese Versuche an Gehölzen mit weniger als 20 cm Stammdurchmesser erfolgten, verbleiben gewisse Zweifel bei einer Übertragung auf Großbäume.

Auch die o.g. biomechanischen Erkenntnisse und einzelne Versuche mit Altbäumen (BADER 2000) legen den Schluss nahe, dass erst durch stammnahe Eingriffe in den Wurzelbereich die maximale Belastbarkeit des Wurzelsystems maßgeblich vermindert wird. Die Durchtrennung weiter entfernter Wurzeln wirkt sich nicht so gravierend aus, weil zunächst vor allem die Widerstandskraft der stammnahen Wurzeln überwunden werden muss, bevor die weiter entfernten Teile des Wurzelsystems ihre volle Wirkung entfalten können. Dies darf aber nicht dazu führen, Eingriffe in den zu schützenden Wurzelbereich zu bagatellisieren, da ihre

destabilisierende Wirkung häufig erst verzögert infolge von Wurzelfäulen eintritt. Für die Beurteilung der Standsicherheit nach Eingriffen sind diese Erkenntnisse aber sehr wohl zum Erhalt wertvoller Altbäume einsetzbar.

Aus der gutachterlichen Praxis lässt sich ableiten, dass bei Eingriffen in den stammnahen Wurzelbereich nicht unbedingt die Anzahl der gekappten Wurzeln die maßgebliche Rolle spielt (vgl. FLL 2010; OLG Karlsruhe 1996). Bei wissenschaftlichen Versuchen zeigte sich jedoch eine deutliche Abhängigkeit der Verminderung der Standsicherheit von der Anzahl der stammnah durchtrennten Wurzeln. Waren 50% aller Wurzeln durchtrennt, wurde die Verankerungskraft auf 75 bis 40% des Ausgangswertes vermindert (SMILEY et al. 2014). Die Autoren führen diese immer noch vergleichsweise hohe Resttragfähigkeit auf das Vorhandensein tiefreichender Wurzeln zurück.

Wenn tiefer liegende Wurzeln verbleiben, sind Wurzel durchtrennungen generell weniger problematisch (MICKOVSIK & ENNOS 2003), so dass der Nachweis der Standsicherheit vielfach auch nach der Kappung oberflächennaher Wurzeln unmittelbar am Stammfuß gelingt (DETTNER & RUST 2014). Hier treten aber die biologischen Folgen solcher Beschädigungen in den Vordergrund, da sie bekanntlich schwerwiegende Auswirkungen auf die zukünftige Entwicklung des Baumes haben können: Vielfach entstehen Versorgungsprobleme, die Wuchskraft des Baumes lässt nach und weitere Schäden am Holzkörper können auftreten.

3.3.2 Erfolgreiche Kompensation

Andererseits sind Bäume bei guter Wuchskraft durchaus in der Lage, Schäden im Wurzelbereich zu begrenzen, eindringende Schadpilze abzuschotten sowie die verminderte Verankerungskraft durch Zuwachs und Wurzelneubildung zu kompensieren. Diese Betrachtungsweise eröffnet Möglichkeiten, angesichts bereits länger zurückliegender Eingriffe in den Wurzelraum zu entscheiden, ob die Standsicherheit eingehend untersucht werden muss oder ob es möglich ist, im Rahmen der weiteren Baumkontrollen mit ausreichender Sicherheit und zumutbarem Aufwand die Verkehrssicherheit zu gewährleisten.

Wissenschaftliche Studien an Forstbäumen haben gezeigt, dass nach Durchforstungen weniger als acht Jahre zur Akklimatisation erforderlich sind (MITCHELL 2000). In dieser Zeit kann ein vitaler Baum seinen Durchmesser durch erhöhte Zuwächse vergrößern, vorhandene Wurzeln verstärken und neue Verankerungswurzeln aus dem Wurzelstock bilden. In einer Untersuchung an jüngeren Rosskastanien war die Verankerung bereits vier Jahre nach der stammnahen Durchtrennung von Wurzeln nicht mehr signifikant vermindert (FINI et al. 2012). Liegt der Eingriff also bereits eine längere Zeitspanne zurück, können eine gute Vitalität, der erkennbare Dickenzuwachs am Stammfuß und die Ausbildung verstärkter Wurzelanläufe als Indikatoren für eine erfolgreiche Kompensation der Schäden dienen.

3.3.3 Gefahrerhöhende Merkmale

Im Laufe der weiteren Entwicklung nach einem Eingriff können aber auch zahlreiche weitere Verdachtsmomente auftreten, die im Zuge von Regelkontrollen erfasst werden und die Beurteilung der Standsicherheit verändern können. Vergrößerte Stammneigung, Risse im Boden oder stammnahe Hebungen bzw. Senkungen sind leicht erkennbare Symptome einer konkreten Umsturzgefahr. Liegen aber lediglich Hinweise auf erhebliche Vitalitätsprobleme vor oder fehlen die o. g. Anzeichen einer erfolgreichen Kompensation, lässt sich die Standsicherheit des Baumes auf visueller Basis in der Regel nicht mehr zuverlässig beurteilen. Dann wären gerätegestützte Untersuchungen, in der Regel durch Zugversuche, erforderlich.

Ausgeprägte unterirdische Schäden an Wurzeln führen vielfach zu Borkenschäden am Stammfuß, teilweise treten Pilzfruchtkörper typischer Splintholzfüuleerreger (z. B. Spaltblättling, *Schizophyllum commune*) an Wurzelanläufen auf – ein deutlicher Hinweis auf massive Beeinträchtigungen im unterirdischen Bereich. Werden bei der Regelkontrolle solche Verdachtsmomente festgestellt, kann eine konkrete Gefahr vorliegen und unverzüglicher Handlungsbedarf bestehen. Ähnliches ist durch die Ausbreitung des Eschentriebsterbens zu beobachten, bei dem befallene Bäume im fortgeschrittenen Stadium Rindennekrosen am Stammfuß aufweisen können. Diese werden vielfach

durch den Hallimasch (*Armillaria sp.*) verursacht und sollten als Hinweis auf massive Fäulnis in den stammnahen Wurzeln gewertet werden (Abbildung 8).

Das Auftreten von Adventivwurzeln kann ebenfalls ein Hinweis auf die mangelhafte Funktion der primären Verankerungswurzeln sein. Allerdings kann die physiologische Leistungsfähigkeit der primären Wurzeln auch wieder hergestellt werden, so dass diese „Notlösungen“ des Baumes nicht mehr erforderlich sind. Erkennbar wäre ein solcher Sachverhalt daran, dass die Adventivwurzeln z. B. nicht mehr wüchsig sind und ihre Durchmesser konstant bleiben, während der Baum eine gute Vitalität aufweist. In diesem Fall könnte die Standsicherheit durchaus durch rein visuelle Kontrollen weiter überwacht werden.

3.3.4 Regelkontrolle nach unklaren Eingriffen

Einschlägige Urteile enthalten keine Aussagen über die Anforderungen an Regelkontrollen nach einem Eingriff, dessen Ausmaß nicht mehr nachvollziehbar ist und dessen Folgen für die Standsicherheit sich nicht unmittelbar beurteilen lassen. Eindeutig entschieden wurde lediglich, dass bei Eingriffen innerhalb der zu schützenden Bereiche eine Überwachung der Baumaßnahme (OLG Karlsruhe 1996; OLG Düsseldorf 2007) bzw. anlässlich einer Wurzelkappung eine weitere Untersuchung geschuldet ist (OLG Celle 2009).

Die grundlegenden Urteile zur Baumkontrolle schließen eine Haftung wegen Verletzung der Verkehrssicherungspflicht aus, wenn keine Anzeichen konkreter Gefahr vorliegen und der Aufwand zur Überprüfung auf verdeckte Schäden nicht zumutbar wäre (vgl. BGH 1965). Unserer Ansicht nach lässt dies den Schluss zu, dass nach Eingriffen, die bereits länger zurückliegen und keine erkennbaren Anzeichen konkreter Schäden am Baum ausgelöst haben, regelmäßig eine Überwachung durch visuelle Kontrollen in angemessenen Intervallen ausreichend ist. Weiterer Handlungsbedarf würde erst dann entstehen, wenn weitere Verdachtsmomente auf gefahrerhöhende Faktoren hinweisen (vgl. hierzu ähnlich OLG Dresden 2013, zitiert bei HILSBERG 2015). Dies bedarf jedoch noch einer abschließenden rechtlichen Würdigung.



Abbildung 8: Borkenschäden durch Eschentriebsterben

3.4 Schräg stehende Bäume

Bereits das grundlegende Urteil des Bundesgerichtshofes von 1965 benennt einen ungünstigen statischen Aufbau eines Baumes oder die Eigenart seiner Stellung als Defektsymptom. Die Baumkontrollrichtlinien listen Schrägstand als besonderes Merkmal, er kann ein Hinweis auf ein partielles Kippversagen sein. Eine konkrete Gefahr lässt sich aber nur anhand weiterer Symptome erkennen bzw. ausschließen. Gerade in diesem Fall spielt die Beurteilung der baumeigenen Kompensationsleistung eine besondere Rolle.

Wenn Bäume einen Schrägstand kompensieren, kann bei Laub- und Nadelgehölzen gleichermaßen die Ausbildung von sog. Stützholz auf der Unterseite des



Abbildung 9: Stützholz am Stammfuß einer schräg stehenden Robinie

Stammfußes beobachtet werden (Abbildung 9). Jüngere biomechanische Modellierungen haben gezeigt, dass eine Erhöhung der Belastbarkeit verschiedener Wurzelsysteme durch Dickenwachstum genau an dieser Stelle besonders effizient möglich ist (YANG et al. 2017). Die häufig postulierte besondere Bedeutung sog. Zugwurzeln lässt sich in dieser Form nicht bestätigen. Um die Verankerung mit ihrer Hilfe zu verstärken, wäre ein höherer Materialaufwand als auf der Druckseite erforderlich. In der Natur findet bei geneigten Bäumen auf der Zugseite oft aber keine erkennbare Reaktion statt.

Stützholz muss deutlich vom sog. Zug- und Druckholz unterschieden werden. Bei letzteren sind der Aufbau der Zellwände, die Form der Holzzellen und die Struktur des Holzes dergestalt verändert, dass die Wuchs-

richtung des Sprosses durch Extension (Druckholz) bzw. Kontraktion (Zugholz) geändert werden kann (ARCHER et al. 1973). Da ältere Bäume am Stammfuß oft enorme Durchmesser aufweisen, ist ein Aufrichten der Sprossachse durch Zug- oder Druckholzbildung aber nicht mehr möglich. Das Stützholz hat daher nur das Ziel, den Baum in seiner geneigten Position zu stabilisieren. Dies wird durch eine Vergrößerung des Durchmessers effizient erreicht (LARJAVAARA & MULLER-LANDAU 2010).

Ein Leittrieb kann sich durch diesen Mechanismus aber sehr wohl wieder entgegen der Gravitation in die Senkrechte aufrichten. Wurde der Baum in der Vergangenheit durch Überlastung im Wind oder infolge von Wurzelschäden plötzlich schräg gestellt, zeigt sich ein abruptes Abknicken der Wuchsrichtung. Wissenschaftliche Experimente hierzu werden meist mit Junggehölzen durchgeführt, die wenige Zentimeter Stammdurchmesser aufweisen (BERTHIER & STOKES 2006; YAMASHITA et al. 2007). In der Fachliteratur wird oft davon ausgegangen, dass zumindest bis zu einem Durchmesser von 10 cm die Änderung der Wuchsrichtung durch die inneren Spannungen noch möglich ist (FOBO & BLUM 1985; COUTANT et al. 2007).

Knickt also der Leittrieb ab und wächst wieder senkrecht nach oben, ist zumindest ausgeschlossen, dass das Kippversagen erst vor kurzem erfolgt ist. Betrachtet man den Durchmesser an der entstandenen Knickstelle, sind über typische Zuwachsraten gewisse Rückschlüsse auf den mindestens seit dem Kippen vergangenen Zeitraum möglich. Bei vitalen Bäumen wäre innerhalb von zehn Jahren nach einem Eingriff eine erfolgreiche Akklimatisation durch Zuwachs und Wurzelneubildung zu erwarten (vgl. 3.3.2).

Zeigt sich ein säbelförmiger Wuchs ohne klare Knickstelle, könnte der Baum vor Jahren durch Erd- oder Schneebewegungen schief gestellt worden sein. Zwar könnte es auch sein, dass der Baum langsam absinkt, dies ist aber wohl viel seltener als die zahlreichen Berichte über absinkende Bäume vermuten lassen und betrifft offenbar nur besondere Standorte. In Zweifelsfällen ist eine Überwachung der Stammneigung mit einer digitalen Wasserwaage möglich, die zur Prüfung regelmäßig auf zwei fest ins Splintholz gesetzten Nägeln platziert wird (Abbildung 10). Treten lediglich



Abbildung 10: Neigungsmessung mit digitaler Wasserwaage

zyklische Schwankungen auf, die den Jahreszeiten (belaubt/unbelaubt) oder verschiedenen Witterungsereignissen (nasse/trockene Krone, Schneeauflage) zugeordnet werden können, lässt sich ein Absinken ohne großen technischen Aufwand ausschließen. In unserer gutachterlichen Praxis sind dabei noch nie gerichtete Neigungsänderungen aufgetreten, die ein Absinken nachgewiesen hätten.

Während unterhalb des maximalen Wassersättigungspunktes noch kein maßgeblicher Einfluss der Bodenfeuchte auf die Standsicherheit festgestellt wurde (WOHN 2003; PETERSON & CLAASSEN 2013; RUST et al. 2013), können Überflutungen durchaus eine erhöhte Umsturzgefahr auslösen. Wenn die Druckstabilität des Bodens stark nachlässt und er zu fließen beginnt, fehlt den Wurzeln das belastbare Fundament, so dass

Druckkräfte nicht mehr abgeleitet werden können. Insbesondere stark geneigte Bäume können dann einseitig einsinken und vielfach bereits unter dem Einfluss ihres Eigengewichtes umkippen.

3.5 Veränderungen im Baumumfeld

3.5.1 Bauliche Veränderungen

Wird der stammnahe Wurzelraum verändert, z. B. durch die Entfernung von Einbauten, die als Widerlager für Verankerungswurzeln dienen, kann die Standsicherheit ebenfalls vermindert werden. Hierzu liegen Ergebnisse vor, die zwar einen signifikanten Zusammenhang mit dem Eingriff, aber nur eine geringe Reduktion der Verankerungskraft um etwa 7% zeigen (SCHÜLLER 2016). Die Auswirkungen von Auflasten im stammnahen Wurzelbereich bzw. deren Entfernung wurden zwar experimentell bereits nachvollzogen (PROSENZ 2012), quantitative Studien fehlen jedoch bislang nach unserer Kenntnis.

Wie schnell sich die Verdichtung oder Versiegelung des Baumumfeldes auf die Verankerungskraft von Wurzelsystemen auswirkt, wurde unseres Wissens bislang nicht erforscht. Bereits bekannte Folgen sind jedoch die Anreicherung der Bodenluft mit Kohlendioxid und die daraus resultierenden Schäden an Versorgungswurzeln (WELTECKE & GAERTIG 2012). Diese könnten im fortgeschrittenen Stadium auch die Verankerung beeinträchtigen. Wie bei anderen oben dargestellten verdächtigen Umständen wäre es daher ausreichend, solche Bäume visuell hinsichtlich zusätzlicher Anzeichen für maßgebliche Schäden zu untersuchen, wie z. B. stark nachlassender Vitalität, Rindenschäden am Stammfuß oder des Auftretens von Fruchtkörpern holzzerstörender Pilze.

3.5.2 Freistellungen

Nach einer Freistellung können besonders hoch aufgewachsene Bäume mit schlanker Schaftform erhöht umsturzgefährdet sein. Ein hoher Schlankheitsgrad allein ist jedoch offenbar kein guter Indikator für konkrete Umsturzgefahr, obwohl pauschale Grenzwerte für die Schlankheit postuliert wurden (MATTHECK et al.

2002). Die wissenschaftliche Grundlage dieser Arbeit wird bezweifelt (GRUBER 2007b; RUST 2014); empirische Feldstudien, die nach starken Stürmen oder mit Hilfe von Bruchversuchen durchgeführt wurden, zeigen sogar den gegenteiligen Befund (WIERSMA et al. 2012; JILLICH et al. 2013).

Solche pauschalen Richtwerte vernachlässigen die grundlegende Frage, welcher Belastung die betroffenen Bäume in einem Sturm tatsächlich ausgesetzt wären. Baumstatische Methoden können nach einer Freistellung zwar die Bruchsicherheit des Stammes anhand überschlüssiger biomechanischer Zusammenhänge abschätzen (WESSOLLY 1995; BRUDI 2015), direkte Aussagen zur Standsicherheit sind jedoch nicht möglich. Insbesondere Bestandsbäume sind in der Lage, sich durch Wurzelverwachsungen gegenseitig zu stabilisieren, so dass die Standsicherheit vielfach höher ist als die Bruchsicherheit des Stammes (COUTTS 1983; DETTER & RUST 2013). Daher bieten solche Abschätzungen lediglich die Möglichkeit einer groben Beurteilung der Kippgefahr.

3.5.3 Akutes Kippversagen

Wurden Bäume im Sturm angekippt, aber nicht vollständig entwurzelt, wird die konkrete Gefahr vielfach durch Veränderungen im Baumumfeld angezeigt, auch wenn keine erhöhte Stammneigung erkennbar ist. Die Baumkontrollrichtlinien nennen Bodenaufwölbungen oder Bodenrisse im Bereich des statisch wirksamen Wurzelraumes als Anzeichen des partiellen Kippversagens (FLL 2010). In einem solchen Fall muss davon ausgegangen werden, dass die maximale Belastbarkeit des Wurzelsystems überwunden wurde und der progressive Kippverlauf tragende Elemente der Verankerung maßgeblich beschädigt hat. Während einer Untersuchung zur Beurteilung der Standsicherheit durch die Messung der Baumbewegung im Wind (GÖCKE et al. 2018) stürzten zwei von sechs Bäumen mit Bodenrissen im Wurzelraum während eines Sturmes um. Auch Lücken im vormals geschlossenen Kronendach eines Bestandes können auf angekippte Bäume hindeuten. Ebenso können durch die Überlastung ganze Wurzelplatten abgelöst werden, Mauern oder Funda-



Abbildung 11: Bodenrisse nach Sturm

mente verschoben bzw. ehemals formschlüssige Verbindungen abgelöst sein.

Die Hinweise auf partielles Kippversagen sind oft schwer aufzufinden und teils nur kurzzeitig erkennbar. Gerade die typischen Bodenrisse sind meist unscheinbar und werden rasch wieder durch Regen oder Setzungsprozesse verschlossen (Abbildung 11). Im Rahmen von Zusatzkontrollen nach Sturmereignissen sollte daher der typische Verlauf einer Sturmböe beachtet werden. Diese löst sich aus schnelleren höheren Luftschichten, strömt in Richtung Boden herab und verliert nach dem Auftreffen auf dem Gelände rasch an Intensität. Bäume, die von der Windböe nicht mehr vollständig entwurzelt, aber angekippt wurden, befinden sich daher regelmäßig am leeseitigen Ende von Böenschneisen in Waldbeständen, Parks oder Straßenzügen. Hier reichte die Energie der Böe zwar noch aus, um die maximale Widerstandskraft der Verankerungswurzeln zu überwinden (Phase 2), die verbliebene Energie war dann aber weitgehend abgebaut bevor das endgültige Kippen (Phase 3) einsetzte. Dies ist möglich, weil im Zuge des Versagensverlaufs sehr viel Verformungs- und Bruchenergie aufgenommen werden kann, wenn die Boden-Wurzel-Matrix sukzessive versagt und zahlreiche Wurzeln brechen, bis der Baum endgültig kippt.

4 Direkte Messverfahren

In Zweifelsfällen ist eine abschließende Beurteilung nur über direkte Messverfahren möglich, die für eine eingehende Untersuchung der Standsicherheit geeignet sind. Derzeit stehen hierfür nur vergleichsweise zeitaufwändige oder kostenintensive Verfahren zur Verfügung. Durch baumstatische Zugversuche kann die maximale Belastbarkeit des Wurzelsystems auch bei maßgeblichen Schäden anhand der Messung der Steifigkeit des Wurzelsystems hochgerechnet und mit der zu erwartenden Windlast ins Verhältnis gesetzt werden. Wissenschaftliche Studien haben die grundsätzliche Eignung der sog. Rotations- oder Kippsteifigkeit als Indikator für dieses Schätzverfahren bestätigt (VANOMSEN 2006; SMILEY 2008; DETTER & RUST 2013).

Weitere Ansätze der wissenschaftlichen Forschung und praktischen Beurteilung der Standsicherheit ergeben

sich aus Langzeitmessungen der dynamischen Stammfußneigung im natürlichen Wind. Zur Beurteilung der Standsicherheit könnten pauschale Richtwerte für kritische Neigungsreaktionen herangezogen werden (JAMES et al. 2013). Andere Autoren zielen darauf, die gemessene Neigung anhand von regionalen Winddaten auf die zu erwartende Windgeschwindigkeit hochzurechnen und so gegebenenfalls eine ausreichende Standsicherheit nachzuweisen (GÖCKE et al. 2018). Da solche Messungen bislang nur bei ausreichender Windgeschwindigkeit durchführbar sind, ist die Einsatzmöglichkeit solcher Verfahren insbesondere zur eingehenden Untersuchung bei Anzeichen einer konkreten Umsturzgefahr noch begrenzt.

Literatur

- ARCHER, R. R.; WILSON, B. F., 1973: Mechanics of the Compression Wood Response: II. On the Location, Action, and Distribution of Compression Wood Formation. *Plant Physiology*, 51(4), 777–782.
- BADER, C., 2000: Untersuchungen über den statisch wirksamen Wurzelraum. Diplomarbeit Fachhochschule Nürtingen.
- BERTHIER, S.; STOKES, A., 2006: Righting response of artificially inclined maritime pine (*Pinus pinaster*) saplings to wind loading. *Tree Physiology*, 26(1), 73–9.
- BLACKWELL, P. G.; RENNOLLS, K.; COUTTS, M., 1990: A root anchorage model for shallowly rooted Sitka spruce. *Forestry* 63, 73–91.
- BREHM, J., 2013: Untersuchungen von Baumverankerungen an Jungbäumen. In: DUJESIEFKEN, D. (Hrsg.): Jahrbuch der Baumpflege. Haymarket Media, Braunschweig, 101–120
- BRUDI, E., 2015: TreeCalc.com – Baumsicherheitsberechnung Online. In: Deutsche Akademie für Sachverständige Grün, dasgrün.de (Hrsg.): Gehölzsymposium 2015, Hannover, 135–141.
- COUTAND, C.; FOURNIER, M.; MOULIA, B., 2007: The gravitropic response of poplar trunks: key roles of prestressed wood regulation and the relative kinetics of cambial growth versus wood maturation. *Plant physiology*, 144(2), 1166–80.
- COUTTS, M. P., 1983: Root architecture and tree stability. *Plant and Soil*, (71), 171–188.
- CROOK, M. J.; ENNOS, A. R., 1996: The anchorage mechanics of deep rooted larch, *Larix europea* x *Larix japonica*. *Journal of Experimental Botany*, 47(303), 1509–1517.
- 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.
- DELPINO, F., 1867: Pensieri sulla biologia vegetale, sulla tassonomia e sul valore tassonomico dei caratteri biologici. *Nuovo Cimento* 25, 284–398.
- DETTNER, A.; RUST, S., 2013: Aktuelle Untersuchungsergebnisse zu Zugversuchen. In: DUJESIEFKEN, D. (Hrsg.): Jahrbuch der Baumpflege. Haymarket Media, Braunschweig, 87–100.
- DETTNER, A.; RUST, S., 2014: Zum Kippverhalten von Bäumen. In: Gehölzsymposium 2014. Hannover: Deutsche Akademie für Sachverständige Grün, 207–217.

- DETTER, A.; RICHTER, K.; RUST, C.; RUST, S., 2015: Aktuelle Untersuchungen zum Primärversagen von grünem Holz. In: DUJESIEFKEN, D. (Hrsg.): Jahrbuch der Baumpflege 2015. Haymarket Media, Braunschweig, 156–167.
- DIN 18 920, 2014: Schutz von Bäumen, Pflanzenbeständen und Vegetationsflächen bei Baumaßnahmen. Deutsches Institut für Normung.
- DUJESIEFKEN, D.; JASKULA, P.; KOWOL, T.; WOHLERS, A., 2005: Baumkontrolle unter Berücksichtigung der Baumart. Bildatlas der typischen Schadsymptome und Auffälligkeiten. Haymarket Media, Braunschweig, 296 S.
- DUPUY, L.; FOURCAUD, T.; STOKES, A., 2005: A numerical investigation into the influence of *soil type and* root architecture on tree anchorage. *Plant and Soil*, 278(1), 119–134. <https://doi.org/10.1007/s11104-005-7577-2>
- ENGLAND, A. H.; BAKER, C. J.; SAUNDERSON, S. E., 2000: A dynamic analysis of windthrow of trees. *Forestry*, 73(3), 225–237.
- FINI, A.; FERRINI, F.; FRANGI, P.; PIATTI, R.; AMOROSO, G., 2012: Effects of ROOT SEVERANCE by excavation on growth, physiology and uprooting resistance of two urban tree species. In: II International Symposium on Woody Ornamentals of the Temperate Zone 990. 2012, 487–494.
- FLL Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V., 2010: Baumkontrollrichtlinien – Richtlinien für Regelkontrollen zur Überprüfung der Verkehrssicherheit von Bäumen, Bonn, 59 S.
- FOBO, R.; BLUM, W., 1985: Über die Mechanik des Druckholzes. *arcus*, (4), 178–190.
- GHANI, M. A.; STOKES, A.; FOURCAUD, T., 2009: The effect of root architecture and root loss through trenching on the anchorage of tropical urban trees (*Eugenia grandis* Wight). *Trees*, 23(2), 197–209. doi.org/10.1007/s00468-008-0269-9
- GÖCKE, L.; RUST, S.; RUHL, F., 2018: Assessing the Anchorage and Critical Wind *Speed of Urban Trees using Root Plate Inclination* in high Winds. *Arboriculture & Urban Forestry*, 44(1), 1–11.
- GRUBER, F., 2007: Die VTA-Rw/r-Grenzregel zum Baumwurf, ein weiteres wissenschaftlich nicht nachvollziehbares und praktisch inadäquates Versagenskriterium der Standsicherheit. *Agrar- und Umweltrecht*, (3), 74–79
- GRUBER, F., 2007 b: VTA-Schlankheitskonstanten sind wissenschaftlich unhaltbar. *pro Baum*, (4), 16–20
- HILSBURG, R., 2015: Aktuelle Baum-Urteile. *Baumzeitung* 1/2015, 36–39.
- JAHN, H.; REINARTZ, H.; SCHLAG, M., 2005: Pilze an Bäumen: Lebensweise, Schadwirkung und Bestimmungsmerkmale der häufigsten Pilzarten in totem Holz und lebenden Bäumen. Patzer Verlag, Berlin, Hannover, 272 S.
- JAMES, K.; HALLAM, C.; SPENCER, C., 2013: Measuring tilt of tree structural root zones under static and wind loading. *Agricultural and Forest Meteorology*, 168, 160–167.
- JILICH, S.; KÖHLER, J.; RUST, S.; RUST, C.; DETTER, A., 2013: Zum Zusammenhang zwischen Schlankheitsgrad und Bruchversagen. In: DUJESIEFKEN, D. (Hrsg.): Jahrbuch der Baumpflege 2013. Haymarket Media, Braunschweig, 267–271.
- JONSSON, M. J.; FOETZKI, A.; KALBERER, M.; LUNDSTRÖM, T.; AMMANN, W.; STÖCKLI, V., 2006: Root-soil rotation stiffness of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst) growing on subalpine forested slopes. *Plant and Soil*, 285 (1–2), 267–277.
- LARJAVAARA, M.; MÜLLER-LANDAU, H. C., 2010: Rethinking the value of high wood density. *Functional Ecology*, 24(4), 701–705. [doi:10.1111/j.1365-2435.2010.01698.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2010.01698.x)
- LUNDSTRÖM, T.; JONAS, T.; STÖCKLI, V.; AMMANN, W., 2007: Anchorage of mature conifers: resistive turning moment, root-soil plate geometry and root growth orientation. *Tree Physiology*, 27(9), 1217–1227.
- MATTHECK, C.; BETHGE, K.; TESARI, I.; KAPPEL, R., 2002: A new failure criterion for non decayed solitary trees. *Arboricultural Journal*, 26(1), 43–54.
- MATTHECK, C.; BETHGE, K.; WEBER, K., 2014: Die Körpersprache der Bäume: Enzyklopädie des Visual Tree Assessment. Karlsruhe: Inst. für Technologie (KIT), 548 S.
- MICKOVSKI, S. B.; ENNOS, R., 2003: Anchorage and Asymmetry in the Root System of *Pinus peuce*. *Silva Fennica*, 37(2), 161–173.
- MITCHELL, S., 2000: Stem growth responses in Douglas-fir and Sitka spruce following thinning: implications for assessing wind-firmness. *Forest Ecology and Management*. 135, 105–114. [Doi:10.1016/S0378-1127\(00\)00302-9](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00302-9).
- MOHRBACH, B., 2015: Zyklische Belastungstests an Ahornblättriger Platane und Silber-Ahorn (Bachelorarbeit). HAWK Göttingen Hildesheim Holzminden, Göttingen.
- NIELSEN C. C. N., 1991: Zur Verankerungsökologie der Fichte. Ökologische und waldbauliche Einflüsse auf die Verankerungskomponenten und den Verankerungslösungsprozess. *Forst und Holz* 46, 178–182
- O’SULLIVAN, M. F.; RITCHIE, R. M., 1993: Tree Stability in Relation to Cyclic Loading. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 66(1), 69–82. doi.org/10.1093/forestry/66.1.69
- PETERSON, C. J.; CLASSEN, V., 2013: An evaluation of the stability of *Quercus lobata* and *Populus fremontii* on river levees assessed using static winching tests. *Forestry*, 86(2), 201–209. [doi:10.1093/forestry/cps080](https://doi.org/10.1093/forestry/cps080)
- POMMINTZ, M., 2016: Mangelnde Standsicherheit von Bäumen nach Baumaßnahmen – Gründe für einen sinnvollen Baumschutz. In: DUJESIEFKEN, D. (Hrsg.): Jahrbuch der Baumpflege 2016. Haymarket Media, Braunschweig, 183–190.
- PROSENZ, R., 2012: pers. Mitteilung im Rahmen von Bruchversuchen RAHARDJO, H.; HARNAS, F. R.; INDRAMAN, I. G. B.; LEONG, E. C.; TAN, P. Y.; FONG, Y. K.; OW, L. F., 2014: Understanding the stability of *Samania saman* trees through tree pulling, analytical calculations and numerical models. *Urban Forestry & Urban Greening*, 13, 355–364.
- REINARTZ, H.; SCHLAG, M., 2006: Visuelle Baumkontrolle. *Wertermittlungsforum*, 24(1), 8–12.
- RUST, S., 2014: Analysis of regional variation of height growth and slenderness in populations of six urban tree species using a quantile regression approach. *Urban Forestry & Urban Greening*, 13(2), 336–343. [doi:10.1016/j.ufug.2013.12.003](https://doi.org/10.1016/j.ufug.2013.12.003).
- RUST, S.; DETTER, A.; FUCHS, C.; SCHIRUTSCHKE, B., 2013: Einfluss der Witterung auf die Ergebnisse statischer Zugversuche. In: DUJESIEFKEN, D. (Hrsg.): Jahrbuch der Baumpflege 2013. Haymarket Media, Braunschweig, 296–300.
- SCHÜLLER, C., 2016: Das Widerlager an Baumwurzeln und sein Einfluss auf die Baumstatik (Masterarbeit). Fachhochschule Erfurt.
- SINN, G., 1985: Kipp- und Bruchgefahr älterer Strassenbäume (Vol. LP 16). Wilnsdorf: SVK-Verlag.
- SMILEY, E.T., 2008: Root Pruning and Stability of Young Willow Oak. *Arboriculture & Urban Forestry*, 34(2), 123–128.
- SMILEY, E.T., 2012: The Likelihood of Tree Failure from Root Cuts or Damaged Sapwood. Vortrag am 24.09.2012, ISA Tree Biomechanics Symposium, Morton Arboretum, Lisle, IL.
- SMILEY, E. T.; HOLMES, L.; FRAEDRICH, B. R., 2014: Pruning of Buttress Roots and Stability Changes of Red Maple (*Acer rubrum*). *Arboriculture & Urban Forestry*, 40(4), 230–236.

- STOKES, A., 1999: Strain distribution during anchorage failure of *Pinus pinaster* Ait. at different ages and tree growth response to wind-induced root movement. *Plant and Soil*, 217, 17–27.
- STOKES, A.; MATTHECK, C., 1996: Variation of wood strength in tree roots. *Journal of Experimental Botany*, 47(298), 693–699.
- VANOMSEN, P., 2006: Der Einfluss der Durchforstung auf die Verankerung der Fichte hinsichtlich ihrer Sturmresistenz (Doctoral thesis). ETH, Zürich.
- WATSON, G., 2012: pers. Mitteilung zum Stand der Untersuchungen mit ARAMIS Tree Project in Zusammenarbeit mit der NASA im Morton Arboretum, Chicago, IL.
- WEBER, K.; MATTHECK, C., 2005: Die Doppelnatur der Wurzelplatte. *Allgemeine Forst- u. Jagdzeitung*, 176(5), 77–85.
- WELTECKE, K.; GAERTIG, T., 2012: Influence of soil aeration on rooting and growth of the Beuys-trees in Kassel, Germany. *Urban Forestry and Urban Greening*, 11, 329–338.
- WESSOLLY, L., 1995: Bruchdiagnose von Bäumen – Teil 2: Statisch integrierte Verfahren – Die statisch integrierte Abschätzung (SIA). *Stadt und Grün*, (8), 570–573.
- WESSOLLY, L., 1996: Standsicherheit von Bäumen. Der Kippvorgang ist geklärt. *Stadt und Grün*, (4), 268–272.
- WESSOLLY, L.; ERB, M., 2014: *Handbuch der Baumstatik und Baumkontrolle*. Patzer Verlag, Berlin, Hannover, 287 S.
- WIERSMA, Y.; DAVIS, T. L.; EBERENDU, E. C.; GIDGE, I.; JEWISON, M.; MARTIN, H.C.; QUIRKE, A., 2012: Hurricane Igor Impacts at Northern Latitudes: Factors. Influencing Tree Fall in an Urban Setting. *Arboriculture & Urban Forestry*, 38(3), 92–98.
- WOHN, J., 2003: Untersuchungen zur Standsicherheit von Bäumen bei Wassergehaltsänderungen im Boden (Diplomarbeit). Fachhochschule Nürtingen.
- YAMASHITA, S.; YOSHIDA, M.; TAKAYAMA, S.; OKUYAMA, T., 2007: Stem-righting Mechanism in Gymnosperm Trees Deduced from Limitations in Compression Wood Development. *Annals of Botany*, 99(3), 487–493, <http://doi.org/10.1093/aob/mcl270>.
- YANG, M.; DÉFOSSEZ, P.; DANJON, E.; DUPONT, S.; FOURCAUD, T., 2017: Which root architectural elements contribute the best to anchorage of *Pinus* species? Insights from in silico experiments. *Plant and Soil*, 411(1–2), 275–291, doi.org/10.1007/s11104-016-2992-0.

Zitierte Urteile

- BGH (1965) Urteil vom 21.01.1965, Az. III ZR 217/63
OLG Celle (2009) Urteil vom 14.05.2009, Az. 8 U 191/08
OLG Dresden (2013) Urteil vom 06.03.2013, Az. 1 U 987/12
OLG Düsseldorf (2017) Urteil vom 17.01.2007, Az. I-18 U 93/06
OLG Karlsruhe (1996) Urteil vom 02.10.1996, Az. 7 U 210/93

Autoren

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 7
82131 Gauting
Tel. (089) 75 21 50
a.detter@tree-consult.org



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

Prof. Dr. Steffen Rust
Fakultät
Ressourcenmanagement
HAWK
Büsgenweg 1a
37077 Göttingen
Tel. (05 51) 50 32–1 73
rust@hawk-hbg.de

