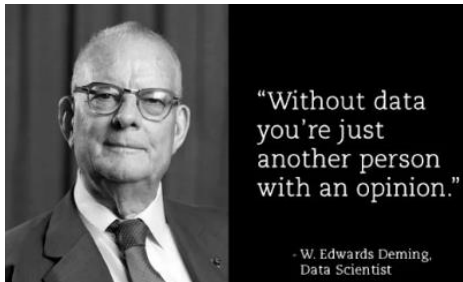


Bäume im Sturm – Standsicherheit über Windreaktionsmessung bestimmen von Lothar Göcke

1 Einleitung

Die Sicherheit von Bäumen ist eine wichtige Frage im Rahmen der Verkehrssicherungspflicht in städtischen Bereichen. Eine gründliche visuelle Inspektion ist immer der erste und wichtigste Schritt bei der Baumkontrolle. Werden bei dieser Kontrolle schwer einschätzbare Schäden festgestellt, sind eingehende Untersuchungen angeraten.



Die Erfahrungen des Gutachters sind bei Baumuntersuchungen von immenser Bedeutung weshalb Menschen mit langer Berufserfahrung tendenziell gute Urteile abgeben.

Die Objektivität der Aussagen wird erheblich gesteigert, wenn Messdaten die Bewertung unterstützen.

Abbildung 1: Foto von Edward Deming. Quelle: Internet

In Abhängigkeit vom vermuten Defekt werden verschiedene Messmethoden angewendet, die grob in *direkte* und *indirekte* Methoden unterteilt werden können.

Indirekte Messmethoden bestimmen einen Parameter, aus dem Schlussfolgerungen über einen Sicherheitsaspekt abgeleitet werden. Zu den indirekten Methoden gehören die Klopfprobe, Bohrungen (Bohrkern, Bohrwiderstandsmessung), eindimensionale Schalllaufzeitmessungen und tomographische bildgebende Verfahren (Schall- und elektrische Widerstandstomographie).

Zumeist wird bei den indirekten Verfahren der Parameter *Restwandstärke* bestimmt. Aus der Restwandstärke wird auf die Bruchsicherheit des Stamms geschlussfolgert – unter Nutzung teils kontrovers diskutierter Richtlinien.

Direkte Methoden messen die tatsächliche Reaktion des Baumes auf eine Kraft hinsichtlich eines Sicherheitsparameters. Direkte Messmethoden sind der Zugversuch und die hier vorgestellte Baumreaktionsmessung auf Wind.

Die Gefahren durch versagende Bäume können grob in zwei Gruppen geteilt werden: Wurzelprobleme können zur Entwurzelung (Windwurf) führen und Schäden im Stamm zu Stammbrüchen (Windbruch), mit ähnlich dramatischen Folgen. Die Auswahl der Messmethode richtet sich folglich nach der Schadstelle (Stamm oder Wurzel), der mutmaßlichen Schwere des Schadens und natürlich nach den Randbedingungen (Risikobewertung, finanzielle Mittel, Dringlichkeit).

Stammschäden können zu einem großen Teil mit den indirekten Methoden erkannt und bewertet werden.

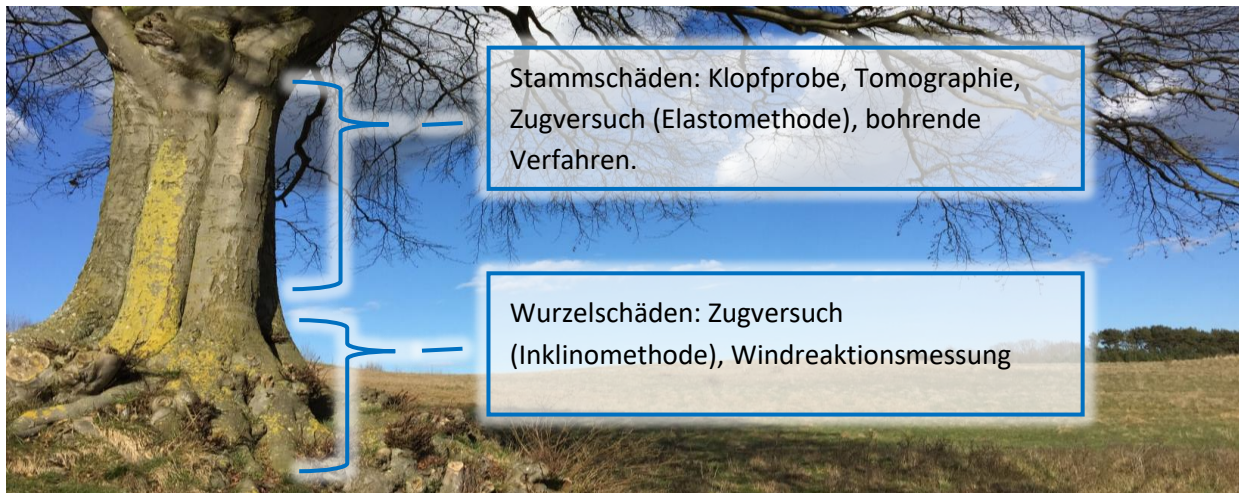


Abbildung 2: Zuordnung der Messmethoden zum den entsprechenden Baumabschnitten

Zur Erkennung und Bewertung von Wurzelschäden sind Zugversuch und Windreaktionsmessung am besten geeignet.

Schwerpunkt dieses Artikels sind die direkten Methoden und vor allem die neue Windreaktionsmessung an Bäumen. Trotzdem werden die Tomographieverfahren kurz erläutert, um die später verwendeten Tomogramme bewerten zu können.

2 Schalltomographie (SoT)

2.1 Messmethode

Die Schalltomographie ist ein Messverfahren zur Erkennung von Schadstellen (Löcher, Fäulen, Risse) in stehenden Bäumen. Das Verfahren wurde erstmalig vorgestellt auf den Osnabrücker Baumpflegetagen 1999 (Göcke, Rust 1999/2000).

Schalltomographie ist eine *indirekte* Messmethode: Anhand der Tomogramme kann der Parameter *Restwandstärke*, also die Position und Dicke des intakten Holzes, bestimmt werden. Aus diesem Messwert wird, im Wesentlichen basierend auf Erfahrungswerten, auf die Bruchsicherheit geschlossen.

Das Verfahren wird mit „SoT“ abgekürzt von der englischen Version „Sonic Tomography“.



Abbildung 3: Schalltomogramm einer Linde

Die Schallsensoren selbst werden über dünne Nägel oder Schrauben akustisch an das Holz angekoppelt. Auf diese Art wird die schalltote Borke des Baumes überwunden, ohne dem Baum signifikante Verletzungen zuzufügen.

Die Geräte messen die Laufzeiten von Schallwellen, die mittels manuellen Klopfens erzeugt werden. Unter Zuhilfenahme der Geometriedaten der Messebene werden die scheinbare Schallgeschwindigkeiten zwischen den Messpunkten bestimmt und in einem Schalltomogramm dargestellt.

Die Schallgeschwindigkeit in Holz hängt vor allem vom Elastizitätsmodul (die Steifheit des Materials) und der Dichte des Holzes ab. Sie variiert nicht nur zwischen unterschiedlichen Baumarten sondern auch zwischen Bäumen derselben Spezies und innerhalb eines Baumes.

Die Auswertesoftware vergleicht die Geschwindigkeiten nach bestimmten Kriterien miteinander, wobei durch eine Selbstkalibrierung der individuellen Variation der Holzeigenschaften des untersuchten Baumes Rechnung getragen wird. Dann wird das Schalltomogramm berechnet: dunkle Farben (Schwarz- und Brauntöne) zeigen Gebiete mit hoher Schallgeschwindigkeit – also gesundes Holz. Signalfarben (violett, blau bis hellblau) weisen Gebiete mit geringer Schallgeschwindigkeit aus – in der Regel defektes Holz oder Luft.

Die Skizze zeigt die theoretischen Laufwege der Schallwellen, wenn man an unterschiedlichen Stellen des Baumes Signale einkoppelt. Der Defekt in der Mitte verhindert die gradlinige Schallleitung.



Abbildung 4: Schalllaufwege, Mitte: Schallmessung an einer Linde (Typ: PiCUS Schalltomograph), Rechts: Schalltomogramm

2.2 Anwendung und Grenzen des Verfahrens

Die Schallausbreitung wird durch jegliche Inhomogenitäten im Holz behindert, die dann im Tomogramm dargestellt werden. Auch Risse oder eingewachsene Rinde stellen Schallhindernisse dar, welche die vollständige Darstellung des gesunden Holzes behindern können. Eine genaue Platzierung der Messpunkte, und die Kombination mit der Widerstandstomographie (oder mit Bohrproben) können in diesen Fällen helfen, Fehleinschätzungen zu vermeiden.

Eine schalltomographische Untersuchung dauert etwa 20 bis 60 Minuten. Die Zeit für die Kommunikation mit interessierten Bürgern ist nicht eingerechnet.

3 Elektrische Widerstandstomographie (ERT)

3.1 Messmethode

Der elektrische Widerstandstomograph (Abkürzung „ERT“ von engl. „Electric Resistance Tomography“) analysiert den Zustand des Holzes eines Baumes mit Hilfe von Messungen des elektrischen Widerstandes des Holzes. Auch die Widerstandstomographie ist eine *indirekte* Messmethode, die darauf zielt, die Restwandstärke zu bestimmen.

Das Verfahren wurde in der Geophysik für Messungen an der Erdkruste entwickelt und etwa ab 1998 von Just und Jacobs (Just & Jacobs, 1998) auf Bäume übertragen. Der elektrische Widerstand des Holzes wird stark vom Wassergehalt beeinflusst. Fäulen und Pilze erhöhen in der Regel diesen Wassergehalt und senken damit den Widerstand. Während einer Messung koppelt der Widerstandstomograph an den Messpunkten elektrische Spannungen ein und misst das daraus entstehende elektrische Feld. Unter Einbeziehung der Geometrieinformationen der Messebene werden durch eine komplexe Software die

elektrischen Widerstände im Bereich der Messebene berechnet. Diese Widerstände werden in einem farbigen Tomogramm dargestellt.

Durch die Überlagerung von Schalltomogrammen mit elektrischen Widerstandstomogrammen kann in vielen Fällen die Restwandstärke zur Bruchsicherheitsabschätzung genauer bestimmt werden. Anders als die Schalltomographie leidet die ERT weniger unter Rissen im Stamm, so dass die ERT Tomogramme oft helfen, die Schalltomogramme richtig zu interpretieren.

Das nachfolgende Beispiel zeigt die Kombination aus drei Widerstandsmessungen an einer Buche mit Pilzbefall. Die blauen Bereiche zeigen die feuchten pilzbefallenen Gebiete. Rote Farben stehen für hohe elektrische Widerstände und zeigen hier gesundes Holz an. Da der Befall nach unten hin zunimmt, ist der Ursprung des Schadens in den Wurzeln zu suchen. Das rechte ERT zeigt die normale Verteilung des Widerstandes in gesunden europäischen Bäumen. Der äußere blaue Ring kennzeichnet das Splintholz, indem die Wasserleitung stattfindet.

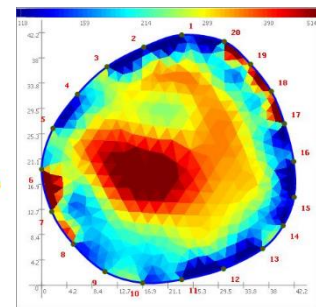
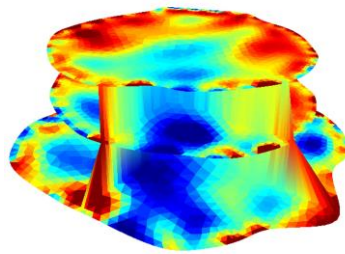


Abbildung 5: Widerstandstomograph (Typ: TreeTronic) 3D Grafik von 3 ERT's, ERT einer gesunden Buche

3.2 Anwendung und Grenzen des Verfahrens

Während einer ERT Messung wird streng genommen der Widerstand eines Stammabschnitts bestimmt, der sich in-, ober- und unterhalb der Messebene erstreckt. Messungen nahe der Erdoberfläche können aufgrund des unterirdisch „fehlenden“ Stamms etwas verfremdet werden.

Die Interpretation der Widerstandstomogramme ist leichter und eindeutiger, wenn auch ein Schalltomogramm angefertigt wurde. Die alleinige Anwendung des ERT kann aufgrund der wechselnden Bedeutung von blauen und roten Farbbereichen für ungeübte Anwender schwierig sein.

Die Widerstandstomographie dauert in der Regel nur wenige Minuten, da sie meist im Anschluss an eine Schalluntersuchung durchgeführt wird, bei der die Messpunkte bereits gesetzt und eingemessen wurden.

4 Statischer Zugversuch

4.1 Messmethode

Die Methode des statischen Zugversuchs als Teil baumstatischer Betrachtungen wurde bereits ab Ende der 1980iger Jahre an der Universität Stuttgart (Sinn & Wessolly 1989) entwickelt und wurde bis heute an über 8000 Bäumen angewandt (Wessolly 2010). Vor allem durch Detter und Rust wurde die Methode in den letzten Jahren wissenschaftlich überprüft und weiterentwickelt (Detter & Rust 2013). Dieser Abschnitt zitiert weitgehend aus (Detter & Rust 2013).

Der Zugversuch ist eine *direkte* Messmethode: eine Kraft wird in den Baum eingeleitet und die Reaktion des Baumes auf diese Kraft wird gemessen. Der bruchtechnisch relevante Parameter ist die Dehnung

(bzw. Kompression) der (Holzrand-) Fasern, die während des Versuches mit „Elastometern“ gemessen wird. Der standsicherheitstechnisch relevante Parameter ist die Wurzeltellerneigung, die synchron mittels „Inclinometern“ erfasst wird.

Grundsätzlich wird in der Baumstatik die Tragfähigkeit des Baumes den zu erwartenden Windlasten gegenübergestellt, um die Sicherheit rechnerisch zu ermitteln. Baumstatische Zugversuche erfolgen in mehreren Arbeitsschritten:

1. Zugversuch: Messung der Baumreaktion auf definierte statische Belastungen
2. Extrapolation: Hochrechnung der Tragfähigkeit hinsichtlich Bruch und Kippen durch Extrapolation auf definierte Grenzwerte
3. Windlastanalyse: Abschätzung der am Standort zu erwartenden Windbelastung, ggf. können wichtige Parameter durch dynamische Messungen (Monitoring im natürlichen Wind, Ausschwingversuche) ermittelt werden
4. Bewertung: Vergleich von Tragfähigkeit und Windlast zur rechnerischen Bestimmung der Stand- und Bruchsicherheit

Schematisch sieht der Zugversuchsaufbau wie nachfolgend abgebildet aus. „Elastometer“ messen die Dehnung/Kompression der Randfasern des Baumes, um die Bruchsicherheit des Stammes abzuschätzen. „Inclinometer“ messen die Neigung des Wurzeltellers, um die Verankerungskraft des Baumes zu messen. Das Zugseil wird in der Krone befestigt und mittels einer Winde wird eine Zugkraft erzeugt, die den Wind simuliert.

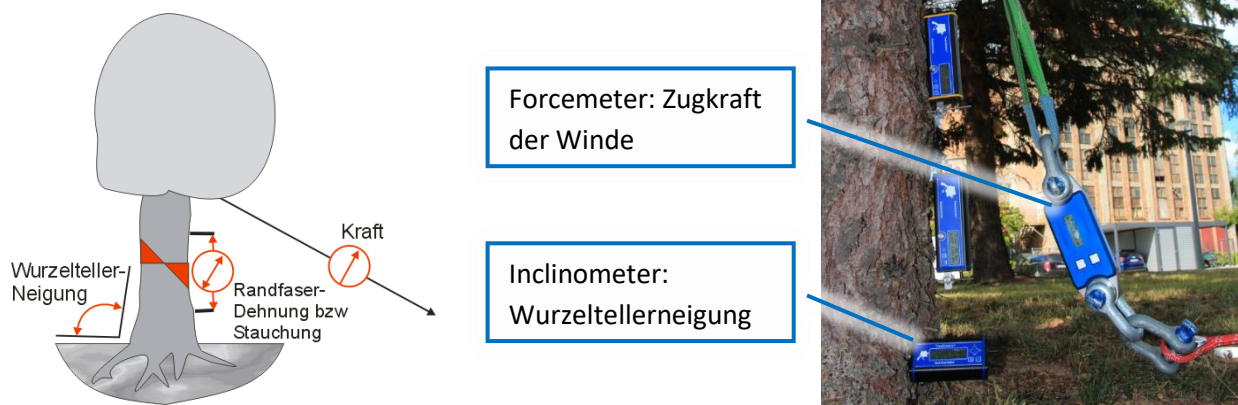


Abbildung 6: Schema des Zugversuches. Rechts: Messinstrumente am Baum (Typ: TreeQinetic)

Die Windlastanalyse ist ein wichtiger Bestandteil des Zugversuches. Über diese Analyse wird die eingebrachte Zugkraft des Seils mit der zu erwartenden Windlast verglichen. Diese Analyse ist heute softwarebasiert. Leistungsfähige Programme stehen zur Verfügung die unter Nutzung von Fotos sowie Baum- und Standortparametern (Baumhöhe, Windzone usw.) die mutmaßliche Windkraft bestimmen.

Nachfolgende Bilder zeigen links die Windlastanalysesoftware: das Bild des Baumes wird genutzt, um die Kronengröße und Form auszumessen. Das Resultat der Standsicherheitsberechnung ist rechts zu sehen: die Daten der Inclinometer, die die Neigung des Wurzeltellers messen, laufen im grünen also sicheren Bereich des Diagramms. Das Verhältnis zwischen grünem Bereich (Baum ist standsicher) und roter Zone (Standsicherheit ist gefährdet) wird durch die Windlastanalyse errechnet.

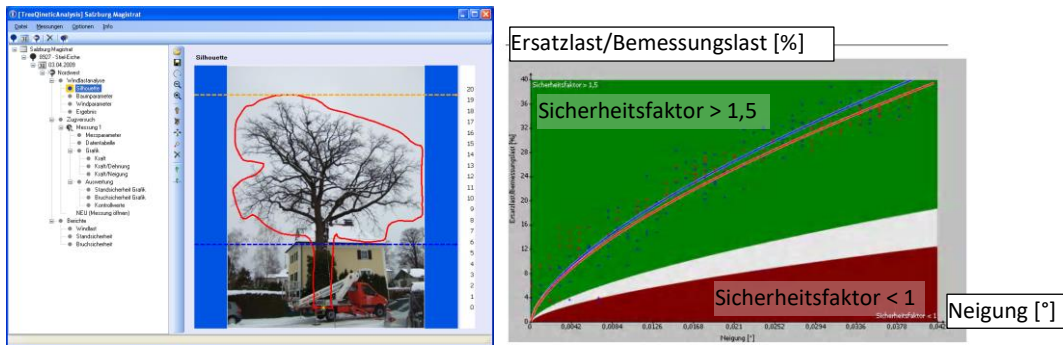


Abbildung 7: Windlastanalysesoftware. Rechts: Ergebnis der Standsicherheitsuntersuchung (Quelle: arbobstat)

4.2 Anwendung und Grenzen des Verfahrens

Die Hauptunsicherheit des Verfahrens besteht in der Abschätzung der tatsächlichen Windbelastung des Baumes. Insbesondere Bäume im urbanen Bereich können Tunnel- oder Abschattungseffekten ausgesetzt sein, die die Windlastanalyse erschweren.

Es sind allerdings nur wenige Fälle bekannt, bei denen Bäume, die im Zugversuch als sicher eingestuft wurden, unerwartet versagt haben. Aufgrund der äußerst geringen Anzahl von Fehlbeurteilungen durch den Zugversuch kann also davon ausgegangen werden, dass die Berechnungsparameter der Methode eher große Sicherheitsmargen beinhalten.

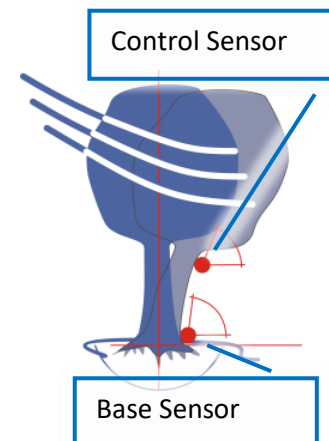
Die Durchführung von Zugversuchen ist mit einem vergleichsweise hohen Arbeitsaufwand verbunden und kann ja nach den Bedingungen (Umfeld, Baumgröße, Anzahl Lastrichtungen) bis zu mehrere Stunden betragen. Die Kosten für Zugversuche sind dementsprechend hoch.

5 Dynamische Baumreaktionsmessung

5.1 Messmethode

Die dynamische Baumreaktionsmessung ist eine *direkte* Messmethode, die die Standsicherheit von Bäumen, also die Wurzelverankerungskraft im Boden, bewertet. Der gemessene Parameter ist die Neigung des Wurzeltellers unter Windbelastung.

Wie der Name der Methode suggeriert, wird bei dieser Messung die dynamische, also nicht statische, Reaktion des Baumes auf natürliche Windereignisse gemessen. Die Grundüberlegung ist gleich der des Zugversuches: die Messung der Wurzeltellerneigung unter Belastung gibt Aufschluss über die tatsächliche Verankerung des Baumes im Boden.



Die Reaktion des Baumes auf den Wind wird über Neigungssensoren erfasst. Ein Neigungssensor wird unmittelbar über dem Erdboden am Stammfuß angebracht. Das ist der *Base Sensor*. Die Neigungswerte, die von diesem Base Sensor gemessen werden, sind ein Maß für die Qualität der Verankerung des Baumes im Boden. Gut verankerte Bäume schwingen wenig im Wind.

Der zweite Sensor, der *Control Sensor*, wird optional etwa 2 Meter über dem Boden angebracht. Die Messwerte des zweiten Sensors werden benutzt, um Störeinflüsse der Umgebung (z.B. Vibrationen im Boden) zu erkennen, die die Neigungswerte überlagern könnten. Im Wind neigt sich der Wurzelteller und der Stamm des Baumes biegt sich. Daher ist bei Windneigungen das Signal des Control Sensors immer größer als das des Base Sensors.



Abbildung 8: Base-Sensor (Eiche in Kritzmow). Rechts: Control Sensor (Tanne auf dem Neuem Friedhof, Rostock)

5.2 Die Wind-Kippkurve

Bereits durch die ausgedehnten Forschungen zum statischen Zugversuch haben wir eine Vorstellung vom Kippverhalten der Bäume: mit zunehmender Kraft steigt die Wurzeltellerneigung überproportional. Das nachfolgende Diagramm zeigt den Zusammenhang qualitativ. Das Diagramm bedeutet, dass es eine Kraftstärke (Seil-Zugkraft beim Zugversuch) gibt, ab der die Baumneigung ohne weitere Krafterhöhung weiter steigt – der Baum kippt. Daher wird bei der Zugversuchsmethode der Begriff der Kippkurve verwendet. Nach den Ergebnissen der Zugversuche tritt das Kippen zwischen etwa 2° und 10° Wurzeltellerneigung auf.

Es liegt also nahe, mittels der Baumreaktionsmessungen im Wind eine entsprechende *Windkippkurve* zu bestimmen. Dafür müssten streng genommen während des Versagens in Stürmen die Wurzeltellerneigung und Windstärke gemessen werden, was noch nicht gelungen ist. Aber wie können wir dennoch die Neigungsdaten bewerten? Oder anders ausgedrückt, welche Baumversagenskriterien können angewendet werden?



Um eine Antwort auf diese Frage zu erhalten, korrelieren wir die Neigungswerte der Bäume im Sturm mit der Windstärke und suchen bei Bäumen mit hohen Neigungswerten nach verdächtigen Symptomen.

Den Aufwand für die Windgeschwindigkeitsmessung halten wir gering, indem wir uns eines einfachen Tricks bedienen: wir nutzen die Messwerte einer nahe gelegenen Wetterstation, also die regionale Windstärke. Diese Messdaten entsprechen zwar nicht der Windstärke unmittelbar am Baum, aber man kann so den Zusammenhang zwischen regionaler Windstärke, sozusagen die offizielle und juristisch relevante Windstärke, und der Reaktion des Baumes darauf messen, einschließlich aller Einflüsse der Baumumgebung. Zu den Umgebungseinflüssen zählen vor allem Abschottungen durch Gebäude oder andere Bäume oder Windkanaleffekte z.B. in Straßenzügen.

Trägt man Windgeschwindigkeit und Wurzeltellerneigung zeitlich einander zugeordnet in einem Diagramm ab, ergeben sich Kurven wie nachfolgend abgebildet.

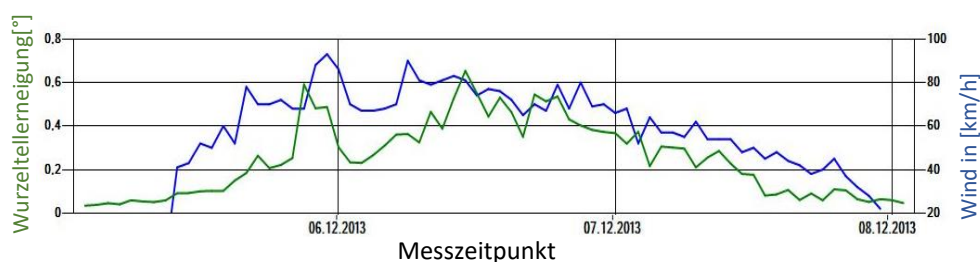


Abbildung 10: Maximale stündliche Windgeschwindigkeit und maximale stündliche Neigung im Zeitbereich

Es ist leicht zu erkennen, dass hohe Windstärken erwartungsgemäß auch hohe Neigungswerte zur Folge haben. Trägt man die Neigungswerte über der Windgeschwindigkeit ab, erhält man die Windkippkurve:

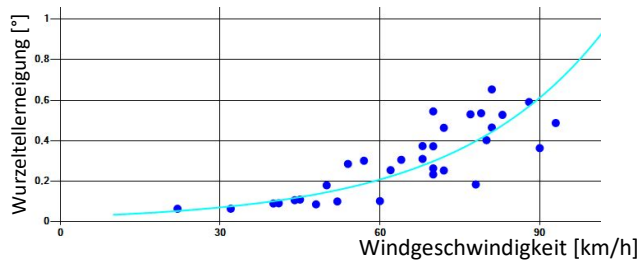


Abbildung 11: Windkippkurve - Wurzeltellerneigung in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit

Durch die Messpunkte im obigen Diagramm wurde eine Ausgleichskurve gelegt. Der Typ der Kurve ist eine e-Funktion, die in unseren Messreihen meist die beste Annäherung darstellte. Abweichungen von der Ideallinie sind dem Messaufbau geschuldet: die Windwerte wurden etwa in 8 km Entfernung zum Baum aufgezeichnet, so dass nicht zu erwarten ist, dass exakt gleiche Windböen Baum und Wetterstation zur gleichen Zeit treffen.

5.3 Bewertung der Daten

Wir verfügen inzwischen über einen Datensatz von über 220 Bäumen in 53 Stürmen. Es ist, wie erwähnt, noch nicht gelungen, einen Baum während des vollständigen Versagens (also Windwurf) zu messen. Aber in den Daten gibt es mehrere Bäume, die eindeutige Wurzel-Versagenssymptome aufweisen: Risse im Boden nach Windereignissen. Das Foto zeigt den Boden nahe einer Fichte, die in einem 93 km/h Sturm eine Wurzeltellerneigung von bis zu 1,4° aufwies.

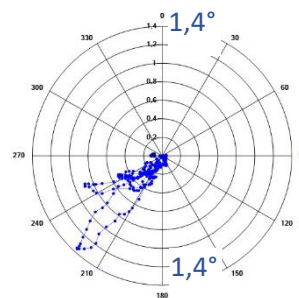
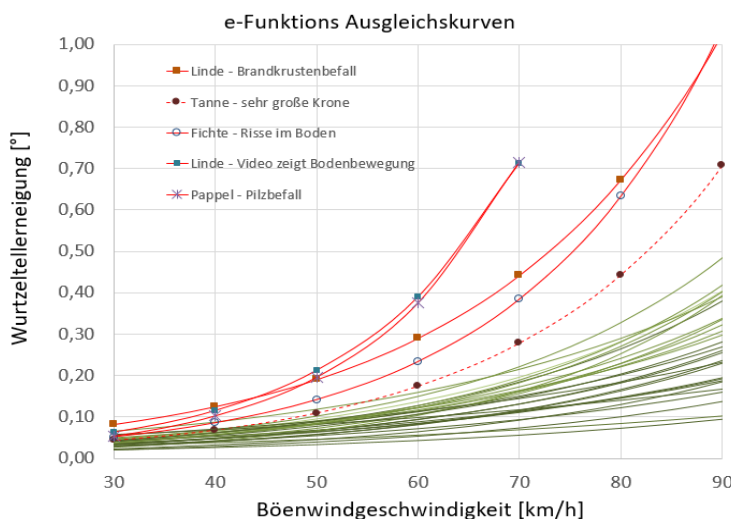


Abbildung 12: Fichte: Risse im Boden nach einem 93 km/h Sturm Neigung des Baumes (Draufsicht)



Im nebenstehenden Diagramm sind Windkippkurven der Bäume eingezeichnet. Neben einigen standsicheren Bäumen (grüne Linien) sind alle Bäume des Datensatzes mit hohen Neigungswerten durch rote Linien dargestellt.

Abbildung 13: Ausgleichskurven von Windreaktionsmessungen von etwa 35 Bäumen

Die wichtigste Schlussfolgerung aus dieser Grafik ist, dass Bäume, die in schweren Sturmböen (89 – 102 km/h) sehr hohe Neigungswerte haben und Wurzelversagenskriterien erfüllen, bereits bei verhältnismäßig geringen Windstärken von 50 bis 60 km/h überdurchschnittlich hohe Wurzeltellerneigungswerte aufweisen.

Und gleichfalls gilt, Bäume mit geringer Neigung bei 50 bis 60 km/h Windböengeschwindigkeit haben auch bei schweren Sturmböen (89 – 102 km/h) unbedenkliche Neigungswerte.

Anhand unserer bisherigen Daten, die an Bäumen mit Durchmessern von 35 bis 160 cm (in 1,3 m Höhe – BHD) und Baumhöhen von 10 bis 35 Metern ermittelt wurden, konnten wir folgende Bewertungskriterien isolieren:

- Wurzeltellerneigung bei 50 km/h $< 0,1^\circ$: Baum ist standsicher
- Wurzeltellerneigung bei 60 km/h $> 0,25^\circ$: Baum zeigt Zeichen von Wurzelversagen bei schweren Sturmböen
- Wurzeltellerneigung bei 100 km/h $> 1,5^\circ$: Hohes Versagensrisiko, Sturmdauer entscheidet über Versagen *)

*) Für den letzten Fall gibt es bislang nur einen Datensatz, der an einer Tanne in Hamburg aufgezeichnet wurde. Der Baum musste noch während des Sturmes gesichert werden.

5.4 Anwendungsszenarien der Windreaktionsmessung

Die Vorteile der Windreaktionsmessung als Wurzel Diagnosemethode liegen klar in der Einfachheit der Messung. Das Resultat spiegelt die tatsächliche Reaktion des Baumes auf den Wind wieder unter Einbeziehung der lokalen Umgebungsbedingungen (Abschottungs- oder Tunneleffekte). Besonders effizient ist die Messung einer großen Anzahl von Bäumen zum selben Zeitpunkt.

5.4.1 Bestätigen der Standsicherheit

Das einfachste Ergebnis bei Windreaktionsmessungen ist die Feststellung, dass ein Baum nicht „wackelt“, also sicher verankert ist. Nicht selten geben Bäume mit sichtbaren Schäden Anlass zur Sorge ob ihres Wurzelsystems, doch verbieten die finanziellen Rahmenbedingungen teure Untersuchungsmethoden. Eine Windreaktionsmessung liefert in diesen Fällen eine belastbare und preisgünstige Alternative. Beispiele sind in den nachfolgenden Fallstudien die „Linde mit Höhlung“ sowie die „Douglasie mit Pilzbefall“.

5.4.2 Identifikation von Bäumen mit Verankerungsproblemen

Nicht selten stellt sich die Problematik, eine Gruppe von Bäumen mit Schadsymptomen zu bewerten. Typische Beispiele dafür sind Anfahrschäden an Straßenbäumen oder Spätfolgen von Rohr- und Kabelverlegungsmaßnahmen. Oft ist visuell nicht zu bewerten, welche Bäume die schwerwiegendsten Schäden haben. Auch hier würden Informationen zur Standsicherheit weiter helfen, die ohne den Aufwand des Zugversuches gewonnen werden könnten. Die Windreaktionsmessung ermöglicht es, die Bäume zu identifizieren, die tatsächlich standsicherheitsrelevante Probleme aufweisen.

Eventuell notwendige Folgearbeiten können sich dann auf genau diese Bäume konzentrieren. Arbeitskraft wie finanzielle Mittel können so gezielter eingesetzt werden. Maßnahmen, die aus Unsicherheit heraus durchgeführt werden, können vermieden werden.

Die nachfolgende Fallstudie „Tannenallee“ zeigt die Windreaktionswerte von 20 Tannen. Die Messwerte zeigen, dass kein Baum Standsicherheitsprobleme hat.

5.5 Grenzen des Verfahrens

Wind ist offensichtlich erforderlich für die Durchführung der Windreaktionsmessung. Sinnvolle Messwerte können ab Böenwindgeschwindigkeiten von 45-50 km/h und höher aufgenommen werden. Tests innerhalb vorgegebener kurzer Zeiträume, z.B. „... die Prüfungen haben innerhalb von 7 Tagen zu erfolgen ...“, sind daher nur selten möglich.

Die Messungen an stark befahrenen Straßen können insbesondere bei schwachen Windstärken zur Überlagerung von Windneigungsmesswerten und erschütterungsbasierten Störimpulsen führen, die es erfordern, die Daten teilweise manuell zu kontrollieren.

6 Fallstudien

6.1 Linde mit Höhlung

Die untersuchte Linde (UBH = 275cm, BH = 16,5m) leidet unter einer großen Höhlung mit umlaufender Fäule wie die Tomogramme zeigen. Die äußeren Wurzeln zeigen indes kräftiges Wachstum.



Abbildung 14: Linde Ansicht von Westen. Schallmessung auf Bodenniveau. Schalltomogramm

Bei Windböen von bis zu 58 km/h wurden Neigungswerte von $< 0,1^\circ$ gemessen. Die Windkippkurve verläuft außerdem sehr flach. Trotz der Höhlung ist der Baum standsicher.

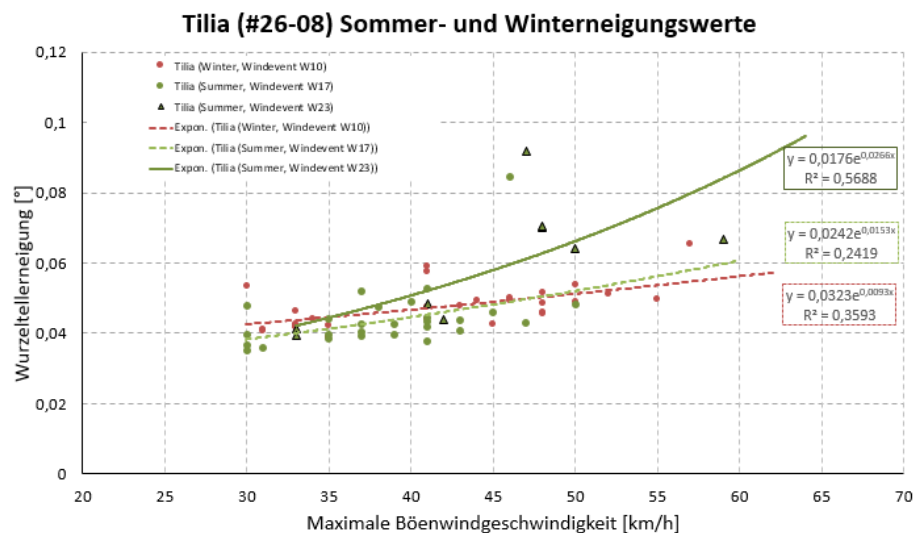


Abbildung 15: Windkippkurven der Linde in Sommer (grün) und Winter (rot)

6.2 Linde mit Brandkrustenpilz

Diese Linde (UBH = 200cm, BH =18,5m) in Rostock hat eine Wurzelfäule durch Brandkrustenpilz. Das Tomogramm zeigt, dass der Befall mit Ausnahme der Wurzelanläufe den gesamten Querschnitt erfasst hat.

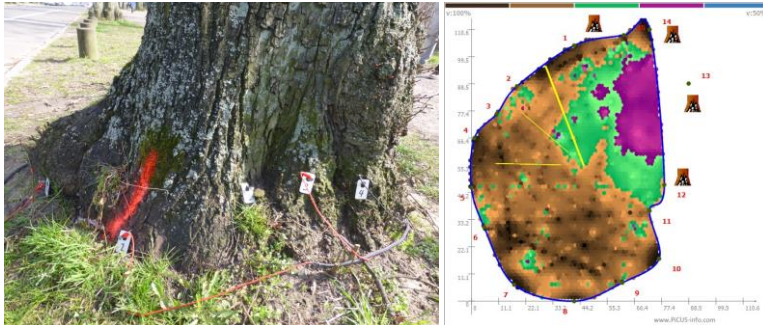


Abbildung 16: Linde mit Brandkrustenpilz

SoT

Im Sturm Xaver im Dezember 2013, der in Rostock etwa 93 km/h Böenwindgeschwindigkeit erreichte, wurde die Windreaktionen dieser Linde und von benachbarten Bäumen gemessen. Die Windkippkurve zeigt, dass die Brandkrustenlinde (rote Kurve) weit stärker reagiert als die Bäume in der Umgebung (grüne Kurven).

Die Steigung der Windkippkurve suggeriert, dass der Baum in einen Orkan (≥ 117 km/h Böenwindgeschwindigkeit) Neigungswerte von weit über einem Grad erreichen würde, was angesichts des Wurzelschadens als kritisch anzusehen ist.

Interessant sind auch die geringen Neigungswerte der Linde 22-5, die auf kräftige Brettwurzeln zurückzuführen sind.

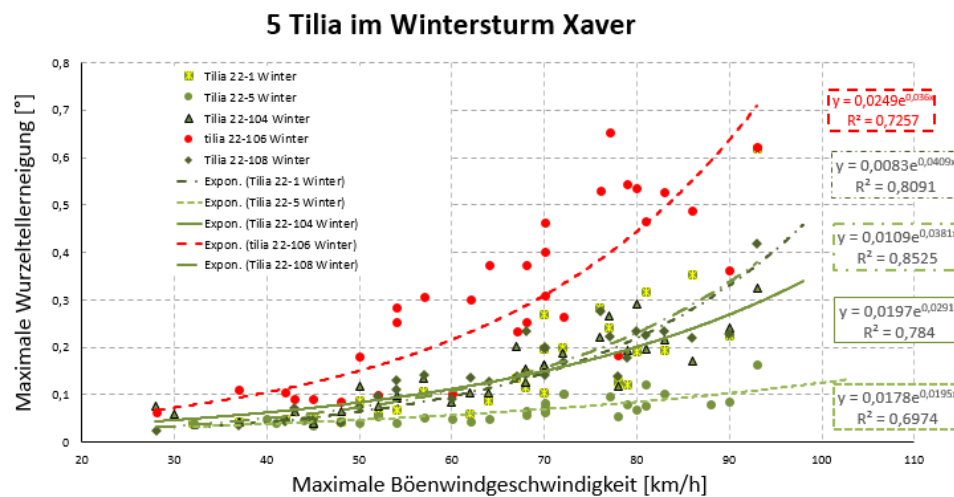


Abbildung 17: Windkippkurven von 5 Linden im Sturm Xaver

6.3 Douglasie mit Pilzbefall

Die untersuchte Douglasie (UBH=256cm, BH=33,5m) leidet unter einer Stockfäule. Die Tomogramme zeigen eine große Faulstelle aber auch kräftige weit ausladende Wurzelanläufe.

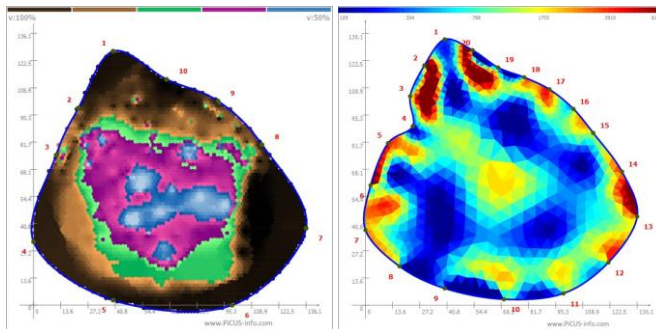


Abbildung 18: SoT - großer Defekt in Stammmitte. Mitte: ERT - der Defekt ist ein Fäule in deren Mitte sich ein Loch bildet. Rechts: Foto der Douglasie

Die maximalen Neigungswerte des Baums in dem 93 km/h Sturm Xaver im Dezember 2013 betragen nur 0,22°. Der Vergleich der Windkippkurven mit zwei Nachbarbäumen (grüne Kurven) zeigt, dass der Baum (rote Kurve) trotz seines Schadens sicherer steht als die defektfreien Nachbarbäume. Die geringe Steigung der Windkippkurve deutet darauf hin, dass das Wurzelsystem des Baums auch orkanartige Böen (102 - 116 km/h) überstehen würde.

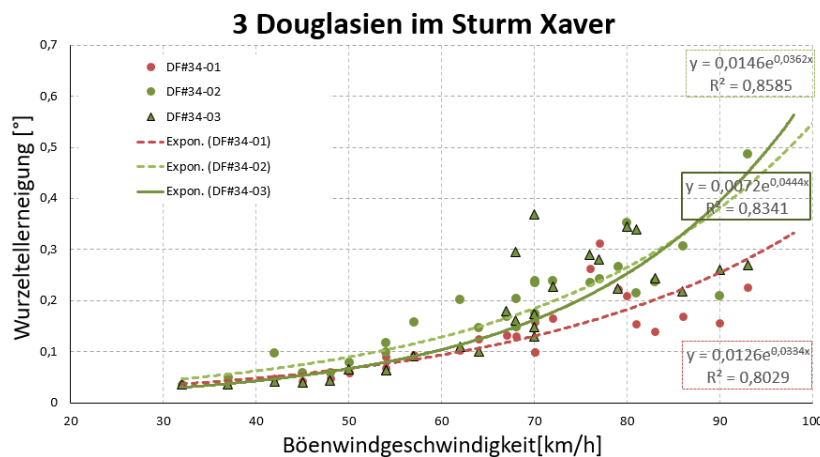


Abbildung 19: Windkippkurven dreier benachbarter Douglasien; Rechts: 3D Grafik der Schallungen bei 29, 100 und 160 cm

Sollte es bei noch höherer Windgeschwindigkeit zu einem Versagen kommen, erscheint aufgrund des weit nach oben reichenden Schadens im Stamm und der guten Verankerung ein Windbruch für diesen Baum wahrscheinlicher als ein Windwurf.

6.4 Tannenallee im Neuen Friedhof, Rostock

Ein gutes Beispiel für eine Gruppenprüfung von Bäumen ist eine Messung an der Tannenallee (Abies grandis). Die Karte zeigt den Standort in Nord-Süd Ausrichtung. Die zu testenden Bäume stehen in zwei Reihen und tragen Nummern 1 bis 21. Der Anlass der Messung sind offensichtliche Stammschäden an einigen der Bäume. Die Tomographieuntersuchung an Baum 11 zeigt eine große Faulstelle im Stammfuß (Messhöhe 5 cm) aber auch, dass die außen liegenden Wurzeln noch intakt sind. Die Frage war nun, wie und ob sich der Schaden auf die Verankerungskraft auswirkt.



Abbildung 20: Lageplan der Tannenallee. Mitte: Ansicht von Süd-Ost. Der Baum vorne links ist Nr. 10. Rechts: SoT von Baum 11

Um ein Gesamtbild des Bestandes zu gewinnen, wurden 20 Tannen in zwei Windereignissen gemessen: Die Bäume 3 bis 13 in einem Sturm aus Richtung West mit maximal 57 km/h Böenwindgeschwindigkeit und die Bäume 1, 2 und 11 bis 21 in einem Sturm aus NNO mit maximal 54 km/h Böenwindgeschwindigkeit.

Die Wurzelneigungswerte von einer Wetterstation in etwa 8 km entfernt aufgenommen. Die Neigungswerte zeigen also die Reaktion der Bäume auf diese regionale Windgeschwindigkeit. Die Windbedingungen direkt am Baum selbst weichen davon ab, bedingt durch die Entfernung zum Windmesser und die Umgebung (andere Bäume, Gebäude usw.). Das nachfolgende Diagramm zeigt die jeweils maximalen Werte der Wurzeltellerneigung für jeden Baum.

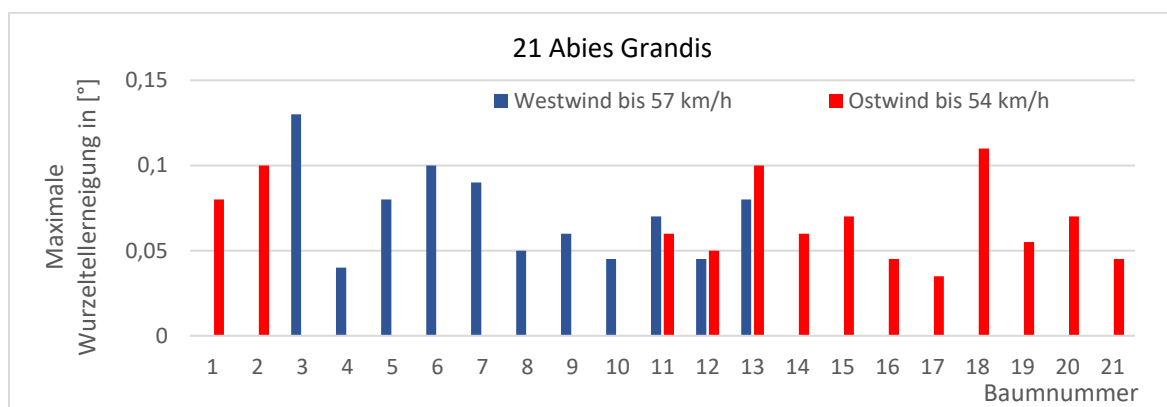


Abbildung 21: Maximale Wurzeltellerneigungswerte der Baumgruppe in zwei Stürmen.

Alle Bäume weisen in den beiden Stürmen unbedenkliche Neigungswerte auf. Insbesondere Baum 11 und Baum 12, der ebenfalls einen Stammschaden hat, sind trotz der Höhlungen gut verankert. Die Windwurfgefahr der Bäume in der Allee ist also gering. Anders als erwartet, zeigten Bäume ohne sichtbare Defekte (6, 18) höhere (aber unkritische) Neigungswerte als Bäume mit bekannten Stammschäden (11, 12, 13).

Die Sensoren zeichneten bei mehreren Bäumen geringe Knackgeräusche auf, die vermutlich von Reibung im Baum während der Windeinwirkung herrührt. Einige Bäume sind also segmentiert und die Segmente bewegen sich gegeneinander.

Für die kleinen Neigungswerte wird es mehrere Erklärungen geben:

- 1) Die Bäume haben gute Wurzeln. Hier ein Foto vom Baum 11 mit Windneigungsmesser (Typ TMS). Der Baum kompensiert den Strukturverlust in der Baummitte durch starkes Wurzelwachstum.



Abbildung 22: Wurzelbildung an Baum 11; Rechts: Totale von Tannen Nr 11, 12, 13

- 2) Die Windexposition ist begrenzt. Sieht man sich das Höhenprofil von Bäumen und Umgebung an, stellt man fest, dass die Testkandidaten nur teilweise über die umgebenden Bäume herausragen und der Wind durch vorgelagerte Bäume bereits nach oben „abgedrängt“ wird. Zur Veranschaulichung sind hier 3D Kartenbilder (Quelle: Google Maps) wiedergegeben.



Abbildung 23: Ansicht der Baumreihe von Westen (Quelle: Google Maps)

- 3) Die Bäume stehen in einer Reihe und nicht als Solitäre. Die Windangriffsfläche ist deutlich unter der des Solitärs. Auch die Kronenbreite ist aufgrund der Reihe vermutlich kleiner als bei Solitären.

7 Zusammenfassung

Mit der Windreaktionsmessung steht ein neues Verfahren zur Standsicherheitsbewertung von Bäumen zur Verfügung. Genau wie der statischer Zugversuch ist die Windreaktionsmessung eine direkte Messmethoden zur Bewertung der Standsicherheit von Bäumen. Die Kraft des Windes auf den Baum bewirkt eine Neigung des Wurzeltellers, die gemessen wird. Es wird also die tatsächliche Windreaktion gemessen, einschließlich der Umgebungsbedingungen wie z.B. Abschottungs- oder Tunneleffekte durch Bäume und Häuser in der Umgebung. Gut messbare Reaktionen treten ab Windstärken von 45-50 km/h auf, was die Anwendung der Technik wetterabhängig macht und für langfristig planbare Projekte prädestiniert.

Liegen Windmesswerte vor, können aus den Neigungsdaten Windkippkurven ermittelt werden. Bei guter Korrelation zwischen Wind- und Neigungswerten ($R^2 > 0,8$) erlauben es diese Windkippkurven, auf

die Reaktion des Baumes auf höhere Windgeschwindigkeiten zu extrapolieren als die, die zum Messzeitpunkt herrschten.

Aus der Reaktion des Baumes bei Böenwindgeschwindigkeiten von 50 bis 60 km/h kann für die Bäume in unserem Datensatz abgeschätzt werden, ob der Baum bei schweren Sturmböen (89-102 km/h) Zeichen von Wurzelversagen zeigt oder nicht.

Die Tabelle vergleicht Zugversuch und Windreaktionsmessung hinsichtlich Durchführbarkeit, Aufwand und Aussage.

Kriterium	Zugversuch	Windreaktionsmessung
Was wird bestimmt	Stand- und Bruchsicherheit	Standicherheit
Reaktion auf den Wind wird ...	geschätzt	gemessen
Art der eingebrachten Last	Statisch (Zugseil)	Dynamisch (Wind)
Durchführbarkeit	Bei Bedarf	Nur bei Wind ab 45km/h in Böen
Hauptsächlich angewendet bei ...	Einzelbäumen	Gruppen und Einzelbäumen
Arbeitsaufwand	Hoch	Gering
Geräteaufwand	Hoch	Gering

8 Abkürzungen

- BH - Baumhöhe
- DBH - Durchmesser in Brusthöhe (etwa 130 cm)
- ERT - Elektrisches Widerstandstomogramm
- SoT - Schalltomogramm
- UBH - Umfang in Brusthöhe (etwa 130 cm)

9 Literatur

Göcke, L., Rust, S. 1999: Vorstellung der Schalltomographie an Bäumen. Osnabrücker Baumpflegetage 1999.

Rust, S.; Göcke, L. 2000: A new tomographic device for the non-destructive testing of standing trees. In: Backhaus GF, Balder H, Idczak E (eds) Plant Health in Urban Horticulture

Detter, A.; Rust, S., 2013: Aktuelle Untersuchungsergebnisse zu Zugversuchen. In „Jahrbuch der Baumpflege 2013“. Seite 87-100.

Just, A., Jacobs, F., 1998: Elektrische Widerstandstomographie zur Untersuchung des Gesundheitszustandes von Bäumen. Tagungsband des VII. Arbeitsseminars „Hochauflösende Geoelektrik“. Institut für Geophysik und Geologie an der Universität Leipzig.

Sinn, G.; Wessolly, L., 1989: Baumstatik – zwei neue zerstörungsfreie Messverfahren. Teil 1: Ermittlung der Stand- und Bruchsicherheit von Bäumen durch Messung. Das Gartenamt 38 (7), 422–428.