

## Der Zugversuch – Messung der Stand- und Bruchsicherheit

Der Zugversuch ist eine etablierte, verletzungsfreie Methode, um die Stand- und Bruchsicherheit eines Baums in mehreren Schritten zu bestimmen. Das Vorgehen orientiert sich dabei an Statik-Berechnungen aus dem Ingenieurbau. Regelwerke und Normen wurden von dort übernommen, um sich den biomechanischen Gegebenheiten einer Pflanze zu nähern. Damit verlässliche Aussagen zur Sicherheit eines künstlichen Bauwerks (z.B. Hochhaus) oder eines natürlichen (z.B. Baum), getroffen werden können, müssen die entscheidenden Einflussfaktoren bekannt sein und in einen mathematischen Zusammenhang gebracht werden: die angreifende Windlast, die kraftabtragende Form und dessen Material. Den mathematischen Rahmen liefert dabei die Baumstatik. Die Grundlagen zur Berechnung der Sicherheit von Bäumen wurden dabei vor rund dreißig Jahren von deutschen Ingenieuren an den Universitäten Tübingen und Stuttgart gelegt. Bis heute wird diese Methode ständig weiterentwickelt und ist Gegenstand und Hilfsmittel aktueller Forschung (Wessolly & Erb, 2014; Detter & Rust, 2013).

Um die Standsicherheit (Sicherheit gegen Kippen) und die Bruchsicherheit (Sicherheit des Stamms gegen Brechen) eines Baums abschließend beurteilen zu können, sind folgende Schritte notwendig:

1. Durchführen eines **Zugversuchs** (Messung der Baumreaktion auf eine angelegte Wind-Ersatzlast). Die Ersatzlast ist viel geringer als die im Orkan auftretende Last und sollte zwischen 10 bis 25 Prozent von dieser betragen. Abbildung 1 veranschaulicht den Versuchs-Aufbau eines Zugversuchs. Die vor Ort gewonnenen Daten dienen der weiteren Analyse am PC.



Abbildung 1: Schematischer Aufbau eines Zugversuchs: Am Widerlager (Säulen-Pappel rechts im Bild, oranger Kreis) wird ein Zugkraftmesser zusammen mit einem Kettenzug befestigt. Mit Hilfe dieser Einrichtung wird an einem Dyneema-Seil (blaue Linie), das in dem zu untersuchenden Baum (Pappel, links im Bild, gelber Kreis) befestigt ist, gezogen. Messgeräte (Rot: Inclinometer; grün: Elastometer) am zu untersuchenden Baum ermitteln die Reaktion der Holzfasern und der Wurzelplatte auf die eingeleitete Kraft.

2. Erstellen einer **Windlastanalyse** am PC anhand eines digitalen Baumfotos und vor Ort gemessener Baumdaten und geschätzter Faktoren. Ergebnis: Grundsicherheit des Baums im vollholzigen Zustand bei Orkanbelastung (vergleiche Abb.2).

<b>Baum-Nummer:</b>	<b>1</b>	<b>Messung:</b>	<b>SIA</b>	Messdatum:	14.02.20																
<b>SIM Baumstatik - SIA</b>				Auswertungsdatum:																	
<b>Lastanalyse nach DIN 1055/1056 + Dynamik</b>																					
<b>Auftraggeber:</b> xxx		<b>Standort:</b> xxx																			
xxx		xxx																			
Baumhöhe:	34.0 m	<b>Lastanalyse:</b>	<b>Art: Populus x canadensis</b>																		
Geländefaktor:	0.18	mit Eigenschwing.	nein																		
CW - Wert:	0.25	Eigenfrequenz:	0.63 Hz																		
Temperatur:	0 °C	Eigenschw.-Ant.:	10 %																		
Geländehöhe:	396 m N.N.	Lastschwerpunkt:	23.6 m																		
Stammumfang:	518 cm	Exzentrizität:	3.6 m																		
Fläche:	337 m <sup>2</sup>	Torsionsmoment:	3 kNm																		
<b>Nettostammdurchmesser</b> für		Windlast:	82.2 kN																		
100% Bruchsicherheit	99.5 cm	<b>Orkanmoment:</b>	<b>1937 kNm</b>																		
		Neigung	0 °																		
<b>Restwandstärkebedarf</b> für		Hebelarm	0.0 m																		
100% Bruchsicherheit	7.6 cm	Formzahl	0.8																		
150% Bruchsicherheit	12.0 cm	Spez. Gewicht	0.95 t/m <sup>3</sup>																		
		Eigeng. Moment:	0 kNm																		
			<b>Berechnung der geometrischen Tragfähigkeit als Vollstamm</b>																		
			W - moment: 365,685 cm <sup>3</sup>																		
			<b>Messung durch:</b> Dipl.Biol. Markus Pehr																		
			<b>Messgrund:</b> Statische Abschätzung																		
		<b>Grundsicherheit bei vollholzigen Stamm:</b>	<b>378 %</b>																		
<b>Lastanalyse analog zu DIN 1056 + Dynamik</b>			<b>Tragfähigkeit bei Biegung</b>																		
<p>Verteilung der Windlast</p> <p>Lastschwerpunkt</p>			<table border="1"> <tr> <td>vollholzige</td> <td>378%</td> <td>Ovalisierung</td> <td>585%</td> </tr> <tr> <td>Stammfäule</td> <td>370%</td> <td>Zwiesel</td> <td>90%</td> </tr> <tr> <td>Stammfäule</td> <td>300%</td> <td>offene Fäule</td> <td>205%</td> </tr> <tr> <td>Stammfäule</td> <td>175%</td> <td>offene Fäule</td> <td>130%</td> </tr> </table>			vollholzige	378%	Ovalisierung	585%	Stammfäule	370%	Zwiesel	90%	Stammfäule	300%	offene Fäule	205%	Stammfäule	175%	offene Fäule	130%
vollholzige	378%	Ovalisierung	585%																		
Stammfäule	370%	Zwiesel	90%																		
Stammfäule	300%	offene Fäule	205%																		
Stammfäule	175%	offene Fäule	130%																		
Arborica Baumdiagnose & Pflegekonzepte, Dipl.-Biol. Markus Pehr, Karl-Bücheler-Str. 18, 78315 Radolfzell																					

Abbildung 2: Beispiel einer Windlast-Analyse. Vor Ort ermittelte Daten und ein digitales Foto des Baums werden am PC analysiert, um die Grundsicherheit des Baums unter Orkanbelastung (circa 120km/h Windgeschwindigkeit) zu errechnen.

## Der Zugversuch – Messung der Stand- und Bruchsicherheit

Wichtige Baumdaten sind zum Beispiel:

*Tabelle 1: Erklärung zur Windlastanalyse: Baumdaten.*

Baumart	Die Baumart beeinflusst über ihren spezifischen Materialwert des Holzes die Berechnung der Bruchsicherheit.
Baumhöhe	Die Baumhöhe ist wesentlich, weil von ihr alle zentralen Berechnungen abhängen. In der Regel wird die Baumhöhe mit dem Maßband gemessen.
(Netto-) Stammdurchmesser	Zentraler Wert zur Berechnung des Widerstandsmoments.
Rindendicke	Wird zur Bereinigung des Stammdurchmessers abgezogen, so dass nur der Holzkörper zur Widerstandsberechnung herangezogen wird.

Diese Baumdaten werden während der Baumkontrolle vor Ort gewonnen und finden Eingang in die Berechnungen zur Grundsicherheit.

Folgende, weitere Parameter sind dabei ebenfalls zentral wichtig und werden in nachfolgender Tabelle erklärt (siehe Tabelle 2):

*Tabelle 2: Erklärung wichtiger Fachausdrücke bei der Windlastanalyse. Quelle: Wessolly & Erb, 2014: Handbuch der Baumstatik und Baumkontrolle, S.273 – 287.*

Grundsicherheit	Nach dem Prinzip einer Kette gleichstarker Glieder gilt die Grundsicherheit für die Bruchsicherheit und Standsicherheit des Baums gleichermaßen und beschreibt, wie sicher der Baum bei Windstärke 12 (Orkanstärke) wäre. Verglichen mit der errechneten Grundsicherheit veranschaulichen die Ergebnisse der Stand- und Bruchsicherheitsmessung einen vorhandenen Abbau durch z.B. Pilze im Stamm und im Wurzelbereich.
Geländefaktor	Geländeformen und Bebauung beeinflussen die bodennahen Windgeschwindigkeiten. In den Windgleichungen von DAVENPORT wird dies durch einen Geländefaktor berücksichtigt.
CW-Wert	Beschreibung der aerodynamischen Güte einer Struktur. Je kleiner der Wert, umso geringer die Windbelastung;
Lastschwerpunkt	Schwerpunkt des Baums, an dem die Windlast angreift.
Windlast	Windkraft, die in Summe am Lastschwerpunkt einwirken kann.
Orkanmoment	Windbelastung am Stammfuß im Orkan
Widerstandsmoment (W-moment)	Maß für die geometrische Tragfähigkeit einer durch Biegung belasteten Struktur (hier: Stamm). Die Tragfähigkeit des Stamms ist in dritter Potenz abhängig von seinem Durchmesser: ein doppelt so dicker Stamm hat also die 8-fache Tragfähigkeit.
Stuttgarter Festigkeitskatalog	Katalog mit Materialwerten grüner Hölzer. Wichtigstes Kriterium für die Elastometer-Auswertung ist die Elastizitätsgrenze.
Elastizitätsgrenze	Bereich der plastischen Verformbarkeit von Holzfasern für die jeweilige Baumart. Wird die Holzfaser über die Elastizitätsgrenze belastet, setzt das Primärversagen der Holzfasern ein. Das Holz beginnt zu brechen.
Druckfestigkeit	Maximaler Druck pro Fläche bis zum Versagensbeginn.

### 3. Berechnung der Stand- und Bruchsicherheit:

Folgende Beschreibung zur Ermittlung der Bruchsicherheit stammt aus den FLL Baumuntersuchungsrichtlinien (1. Auflage 2013, S.20):

„Zur Ermittlung der Bruchsicherheit wird unter der definierten biegenden Zuglast in der Baumkrone die Dehnung der äußeren Holzfasern gemessen. Durch rechnerischen Vergleich dieser Dehnung mit der Elastizitätsgrenze grüner Hölzer (z.B. Stuttgarter Festigkeitskatalog) erhält man die Bruchlast des gemessenen Baumteils. Die Bruchsicherheit ergibt sich aus der Bruchlast an der schwächsten Stelle im Vergleich mit der Orkanlast aus der Windlastannahme.“ Mit anderen Worten ausgedrückt, sucht man bei der Bruchsicherheitsbestimmung die schwächste Stelle am Stamm, indem man auf verschiedenen Ebenen Dehnungswerte ermittelt. Gemessen wird die Dehnung (Elastometer wird auf der Zugseite des Holzes platziert und dort auseinandergezogen) bzw. Stauchung (Elastometer wird auf der Druckseite des Holzes platziert und dort zusammengedrückt) der äußersten Holzfaser in Untersuchungsrichtung. Die Wahl der Untersuchungsrichtung wird von mehreren Faktoren beeinflusst: eindeutige Schadstellen, Anströmbarkeit im Wind, wahrscheinlichste Versagens-Richtung, u.v.m. Bei solitär stehenden Gehölzen wird z.B. in der Regel in zwei Richtungen gemessen: die erste Richtung wird durch die genannten Faktoren vorgegeben, die zweite Richtung wird in der Regel im 90-Grad-Winkel dazu gewählt. Sind Bäume nur in einer Richtung gut anströmbar und ist die Versagensrichtung dadurch vorgegeben (keine weiteren eindeutigen Schadstellen sind erkennbar, die eine andere Versagensrichtung wahrscheinlich machen), reicht die Untersuchung in einer Richtung aus – wie dies bei der Untersuchung der hier behandelten Gehölze der Fall war.

Das Ergebnis der Bruchsicherheit wird also von der schwächsten, ermittelten Stelle am Stamm vorgegeben. Sie gilt für eine gedachte Achse durch den Stamm in Untersuchungsrichtung (eine Aussage zur Bruchsicherheit könnte z.B. lauten: in nord-südlicher Richtung beträgt die Bruchsicherheit an der schwächsten Stelle circa 190 Prozent).

Zur Ermittlung der Standsicherheit seien hier nochmals kurz die FLL Baumuntersuchungsrichtlinien (1. Auflage 2013, S.20) zitiert:

„Zur Ermittlung der Standsicherheit wird unter der o.g. Zuglast die Neigung am Stammfuß gemessen. Im Vergleich mit dem generellen Neigungsverhalten windbelasteter Bäume (z.B. verallgemeinerte Kippkurve/ Neigungszunahme pro Zugkrafteinheit) erhält man die Versagenslast der Verankerung im Boden. Wie bei der Bruchsicherheit s.o. ergibt sich der Standsicherheitswert aus dem Vergleich der Versagenslast mit der im Orkan auftretenden Last, die bei der Windlastannahme ermittelt wurde.“ Die Standsicherheit ist also ein Wert für die Güte der Verankerung eines Baums im Boden bei Orkanbelastung.

Die Standsicherheit und die Bruchsicherheit eines Baums sind zwei unabhängig voneinander existierende Sicherheitswerte und werden im Zugversuch ermittelt. Im Idealfall des vollholzigen, gesunden Baums sollten sich die Werte der Grundsicherheit (errechneter Wert der Sicherheit aus der Windlast-Analyse; gilt für die Stand- und Bruchsicherheit gleichermaßen) sowie den am Baum gemessenen Werten der Standsicherheit und der Bruchsicherheit entsprechen. Denn statistische Auswertungen haben gezeigt, dass der Baum die Sicherheiten seiner Baumteile ähnlich dimensioniert wie die gleichstarken Glieder einer Kette. Diese Beobachtung scheint sowohl für gesunde als auch für geschädigte Bäume zu gelten (Wessolly & Erb, 2014, S.123). Sind die gemessenen Werte der Stand- und/oder der Bruchsicherheit schlechter als die gemessene Grundsicherheit, so spricht man von einem Abbau der Sicherheit. Einen Abbau können z.B. holzzersetzende Pilze verursachen oder aber auch durch mechanische Schäden hervorgerufen werden (z.B. durch stammnahe Wurzelkappungen). Die Stand-

und/oder die Bruchsicherheit kann in manchen Fällen aber auch besser sein als die errechnete Grundsicherheit. Falls keine unrichtigen Annahmen der Windlast-Analyse zugrunde liegen, kommen hier zuwachsende Prozesse infrage (z.B. durch Dickenwachstum verstärkte Stammteile, sog. Zug- und/oder Druckholz) aber auch Abweichungen zwischen den tatsächlichen und den verwendeten Materialeigenschaften des Holzes könnten ursächlich dafür sein.

#### 4. Bewertung der Baumsicherheit

Eine exakte Erfassung der Sicherheit eines Baums ist nicht möglich. Diesem Umstand geschuldet ist es notwendig, einen Sicherheitsfaktor in die Berechnungen einzuführen. Die Baumstatik fordert deshalb – wie auch im Flugzeugbau üblich – einen Sicherheitsfaktor von 1,5 oder von 150% Sicherheit eines Baums unter Orkanbelastung. Baumstatische Betrachtungen sind als Extremwert-Analysen angelegt – den Aussagen sind hier grundsätzlich die ungünstigsten Werte zugrunde gelegt. Zusammen mit dem Sicherheitsfaktor von 1,5 erlauben die getroffenen Annahmen Aussagen zur Sicherheit eines Baums über einen längeren Zeitraum hinweg bis zur nächsten erforderlichen Nachkontrolle. Liegen die gemessene Stand- und Bruchsicherheit über 150 Prozent bei Orkanbelastung, so sind sicherheitserhöhende Maßnahmen wie z.B. Kroneneinkürzungen in der Regel nicht notwendig. Liegen die Messwerte unter dem Sicherheitsfaktor, sind Maßnahmen notwendig, um das Sicherheitspolster des Baums zu erhöhen.

Durch eine Gewichtung des biologischen Zustands einerseits und der gemessenen Sicherheitswerte andererseits wird ein Zeitraum bis zur nächsten notwendigen Nachkontrolle der Sicherheitswerte durch den Sachverständigen festgelegt. Da sich zuwachsende Prozesse (durch Dickenwachstum des Baums) und abbauende Prozesse (durch Holzabbau holzersetzer Pilze) in der Regel die Waage halten, ist mit einem plötzlichen Baumversagen nicht zu rechnen, es sei denn, dass plötzliche Vitalitätseinbußen des Baums das Fortschreiten der abbauenden Prozesse einseitig begünstigen. Hier greift aber in der Regel das Prinzip der Regelkontrolle als Sicherheitsinstanz. Durch regelmäßige, fachkundige Inaugenscheinnahme - in der Regel finden Baumkontrollen im Abstand von halbjährlichen bis dreijährlichen Intervallen statt - wird ein solcher Umstand rechtzeitig erkannt und weiterführende, erneute Untersuchungen können angestoßen werden.

Als Schlussfolgerung aus den Ergebnissen des Zugversuchs – wie auch aus allen anderen eingehenden Untersuchungen am Baum – stehen baumpflegerische Maßnahmenempfehlungen, welche dazu dienen, die Verkehrssicherheit des Baums wiederherzustellen. Ein Sicherheitspolster von 1,5 wird im Rahmen eines Zugversuchs als ausreichende Sicherheit gegen Kippen oder Brechen von Bäumen oder Baumteilen angesehen. Abweichungen davon sind möglich (z.B. bei noch jungen Bäumen, welche vorwiegend in ihr Höhenwachstum investieren; hier sind Werte unter 150 Prozent Sicherheit die Regel), bedürfen aber einer Begründung durch den Sachverständigen.

Die Maßnahmenempfehlungen zur Wiederherstellung der Verkehrssicherheit werden mit einem Datum versehen, bis zu welchem diese durchgeführt werden müssen. Je nach Bewertung der Sicherheitslage kann ein solcher Zeitraum zwischen sofortigem Durchführen und einer Durchführung innerhalb von zwei Jahren liegen.

### Grenzen der Methode

Baumartenspezifische Materialwerte zur Bestimmung der Bruchsicherheit werden momentan zumeist dem „Stuttgarter Festigkeitskatalog für grüne Hölzer“ (Wessolly & Erb, Handbuch der Baumstatik und Baumkontrolle, 2014) entnommen. Ergebnisse aus bisherigen Untersuchungen legen den Schluss nahe, dass das Baumalter durchaus einen Einfluss auf die Materialeigenschaften des Holzes hat. Auch innerhalb einer Baumart und Altersgruppe gibt es eine gewisse Streubreite der Materialeigenschaften. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf um diese Einflussfaktoren zukünftig bei der Auswertung gebührend berücksichtigen zu können. Bei der Bestimmung der Standsicherheit gibt es zwischen den verschiedenen Baumarten eine Streuung bei der Hochrechnung der Versagenslast, welche in der bisherigen „allgemeinen Kippkurve“ (Wessolly & Erb, 2014) keine Berücksichtigung findet. Auch hier gibt es weiteren Forschungsbedarf, damit diese baumartenspezifischen Schwankungen in Zukunft besser berücksichtigt werden können und die Ergebnisse der Standsicherheit nicht u.U. unter- bzw. überschätzt werden (Detter & Rust, 2013).

Auch klimatische Einwirkungen können Auswirkungen auf die Zugversuche haben, so dass die Stand- und Bruchsicherheit über- oder unterschätzt werden kann. Den deutlichsten Einfluss zeigen eine hier die Bodenfeuchte zusammen mit der Bodenart und stark gefrorener Boden (Detter & Rust, 2013). Laut den Autoren kann ein extremer Bodenwassergehalt den Kippvorgang maßgeblich beeinflussen. Messungen in strengen Frostperioden haben gezeigt, dass die Bruch- und die Standsicherheit jeweils stark überschätzt wurden. Dies lag an den gefrorenen Stämmen und dem tief durchgefrorenen Boden (Detter & Rust, 2013).

Dennoch kommen die Autoren zu einer sehr positiven Einschätzung zur Aussagekraft des Zugversuchs, indem sie feststellen: „Bisher ist nur eine äußerst geringe Anzahl von Fehleinschätzungen durch Zugversuche, die zu einem unvorhergesehenen Versagen geführt haben, bekannt geworden. Dies bestätigt die Ergebnisse der bisherigen Untersuchungen, wonach die verwendeten Auswerteverfahren und Grenzwerte grundsätzlich sachlich richtig sind und die Sicherheitsreserven nicht zu hoch eingeschätzt werden.“

### Verweise

Detter, A., & Rust, S. (2013). Aktuelle Untersuchungsergebnisse zu Zugversuchen. *Jahrbuch der Baumpflege* (S. 87 - 100). Braunschweig: Haymarket Media GmbH und Co. KG.

Wessolly, L., & Erb, M. (2014). *Handbuch der Baumstatik und Baumkontrolle*. Berlin - Hannover: Patzer Verlag.