

Analyse von Tornado- und Downburst-Windschäden an Bäumen

Analysis of Tornado and Downburst Wind Damage to Trees

Von Martin Hubrig

Abstract

For more exact investigations about tornadoes and downbursts – to which intensity distributions also belong too – the estimation of intensity of an accurate great number of events is a condition. By the TORRO-Scale, based on the Fujita-Scale, well adjusted on the condition of middle Europe, this is possible in the case of damages to buildings. Neither in the case of the Fujita-Scale nor in the case of the TORRO-Scale damages to woody plants there is no exact estimation of intensity possible until now.

Because of worldwide comparable stability of woody plants by great variation within the same species they will be fundamentally suitable to make distinctions about storm-intensities. For this assessment the types of storm damage and the parameter, which describe the resistance of trees, respectively forests against the power of wind must be consulted. This investigation is based on several own case studies, added by case studies and investigations about tree-statics of other authors. As the result of this investigation, a table of defined storm-damage-intensities to trees and stands, based on the TORRO-Scale, is presented.

1 Einleitung

Neben der Erfassung des zeitlichen und räumlichen Auftretens von Tornados und Downbursts ist eine möglichst exakte Einstufung ihrer Intensität wünschenswert, um ein potenzielles Risiko für bestimmte Regionen besser abschätzen zu können. Da viele Tornados aufgrund ihrer oft geringen Flächenausdehnung nicht über menschliche Bebauung ziehen und für die allermeisten keine Geschwindigkeitsmessungen vorliegen, ist eine grobe Einschätzung der Windgeschwindigkeiten bisher offen oder sehr unsicher. Die Angaben für Baum- bzw. Waldschadensintensitäten sind in der TORRO-Skala von Meaden (1976) ebenso wie diejenigen in der Fujita-Skala (Fujita u. Pearson 1973, Fujita 1981) zu grob, um Intensitäten differenzieren zu können. Diese Lücke sollte mit einer Skala, die den an Holzgewächsen aufgetretenen Schäden bestimmte Intensitätsstufen zuordnet, geschlossen werden. Als ein großer Vorteil gegenüber Gebäudeschäden gelten weltweit vergleichbare Festigkeiten von Holzgewächsen, denn die Bauweisen unterscheiden sich in vielen Bereichen stark, so dass Gebäudeschäden nur bedingt vergleichbar sind.

Dass insbesondere in den USA eine Einbeziehung der Vegetation für die Intensitätseinstufung von Stürmen interessant, hierüber aber noch zu wenig bekannt ist, zeigt der National Weather Service (NWS 2003) auf.

2 Arten von Sturmschäden und ihre Klassifikation

Zur Beurteilung der Intensität eines Sturmes muss zunächst die durch ihn verursachte Schadensart erkannt werden. Unterschiedliche Schadensbilder weisen grundsätzlich auch auf unterschiedliche Sturmintensitäten hin. Die auf einen Baum ausgeübte Windintensität ist erst nach einer kombinierten Betrachtung der Schadensart in Bezug auf statisch relevante Baumparameter zu beurteilen.

Rottmann (1985) unterscheidet die in a – c aufgeführten Arten von Sturmschäden:

a) Stammbruch: Hier wird aufgrund von mechanischer Überbeanspruchung der Stamm, der Stock oder die Wurzel gebrochen, wobei aber zumindest Teile des Wurzelwerkes in ihrer ursprünglichen Lage im Boden verbleiben. Nach Mattheck (1992) versagt der Baum durch Faserknicken auf der Druckseite der Biegung und Faserzerreißen auf deren Zugseite. Bei Schäden an Stamm und Krone werden Schaft-, Wipfel-, Ast- und Stauchbrüche (Faserstauchungen) unterschieden.

Die Brucharten überwiegen auf stabilen Standorten. Auf diesen sind die Bäume aufgrund der Bodeneigenschaften in der Lage, sich fest zu verankern. Im Allgemeinen gilt die Regel: Je plötzlicher und stärker der Sturm, desto höher ist der Anteil an Stammbrüchen. Daher deuten Stammbrüche häufig auf hohe bis sehr hohe Windintensitäten hin.

b) Sturmwurf: Dieser ist dann eingetreten, wenn die Wurzel eines Baumes ihre Lage verändert hat. Es reißen zuerst die luvseitigen Wurzeln, worauf die leeseitigen geknickt werden. Sturmwurf entsteht bei unzureichender Verankerung. Die Verankerung eines Baumes ist abhängig von der baumartenspezifischen Wurzel Ausbildung, dem Standort und dem aktuellen Bodenzustand. Allgemein kann gesagt werden, dass Sturmwurf eher ein Indiz für geringere Windintensitäten ist.

c) Druckschäden: Dieser Sturmschadentyp tritt eher selten, jahreszeitenspezifisch vor allem während der Vegetationsperiode von Mai bis September auf, wenn ein starker Sturm die Bäume im Vollsaft trifft (Woelfle 1936). Während dieser Zeit ist die Schnellkraft von Holzgewächsen herab-, die Biegefestigkeit jedoch heraufgesetzt. Beim Überschreiten der Holzfestigkeit verhindert die Schädigung der Holzstruktur ein Zurückschnellen des Baumes in die Ausgangslage. Permanent umgebogene oder schiefstehende Bäume sind die Folge.

Bei sehr plötzlichen, starken Windstößen – nach Analogieschlüssen an betroffenen Gebäuden ab T4/F2 (Erläuterung s. Tab. 1) aufwärts, erleiden junge (unter 30-jährige), fest verwurzelte Bäume mit noch sehr hoher Biegefestigkeit irreversible Druckschäden, d. h. sie richten sich nach der Belastung nicht wieder auf.

Druckschäden kann man oft am Rand von Schadensschneisen beobachten. Offenbar reicht hier die Windintensität für ein Brechen der Bäume nicht aus. Daher müssen auch die Druckschäden mit der Ausnahme, wenn diese an jungen Bäumen und Sträuchern auftreten, als Indiz für geringere Windintensitäten gelten.

Darüber hinaus können Tornados folgende Sturmschadensarten verursachen:

d) Entrindung: Bekannt ist die Entrindung stehengebliebener Baumteile bei verheerenden Tornados (ab T8/F4). Diese wird nicht durch die Windgeschwindigkeit unmittelbar, sondern durch die mit hoher Geschwindigkeit mitgeführten Kleintrümmer wie Staub, Sand, Steinchen und ähnliches verursacht (Sandstrahleffekt). Auch für Mitteleuropa gibt es Beispiele für derartige Sturmschäden, wie den Tornado von Hainichen im Erzgebirge am 23. April 1800 (Wegener 1917).

e) Herausreißen: Dieser Schaden kann bei stärkeren Tornados dann auftreten, wenn starke Sogkräfte die Verankerungsfestigkeit und das Gewicht von Holzgewächsen überschreiten. Es ist davon auszugehen, dass diese Art von Schaden mit der Zunahme von Tornadostärken exponentiell zunimmt. Einzelne Beispiele für eine Herausreißen ganzer Bäume oder gar Baumgruppen sind durch Augenzeugen belegt. Auch anhand des Wurfbildes einer älteren Buche in einem untersuchten Fall (Hubrig 1999) ist von der Existenz dieser Art von Sturmschaden auszugehen. Wegener (1917) zitiert außerdem die ungewöhnlichen Sturmschäden des Tornados von Woldegk aus dem Jahr 1764: Hier wurden nur wenig aus der Erde hervorragende Stümpfe wenige Jahre zuvor gefällter Eichen vom Wirbel aus dem Erdboden gezogen, was auf einen enormen Aufwind hinweist.

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die F- und T-Skala, die zugehörigen Windgeschwindigkeiten und typische Schadenssätze S für Leicht- (S-) und Massivbauten (S+) in Mitteleuropa. Die in der Versicherungswirtschaft oft verwendete Größe "Schadensatz" bezeichnet das Verhältnis Schaden zu Neuwert in Prozent. Diese für Mitteleuropa angepassten Werte wurden in Zusammenarbeit mit der Münchener Rückversicherung ermittelt (vgl. Dotzek et al. 2000, 2001).

Wichtig sind in der Tabelle auch die Begriffe zur groben Klassifikation der Tornado-Intensität: Schwach (*weak*; F0, F1), stark (*strong*; F2, F3) und verheerend (*violent*; F4, F5).

Tornados einer Intensität von F2 oder mehr werden als signifikant (*significant*) bezeichnet, Tornados mit negativer F- oder T-Skala als unterkritisch (*subcritical*)

3 Stabilitätsparameter von Holzgewächsen

Ist die Sturmschadensart bekannt, muss beurteilt werden, wie resistent die betroffenen Baumindividuen gegenüber Windlasten gewesen sind. Hierfür müssen die in Frage kommenden Parameter der Sturmresistenz von Waldbäumen folgendermaßen bestimmt, erfasst und bewertet werden:

a) Die Lage der Bäume im Gelände: Freistehende Bäume weisen grundsätzlich eine hohe Resistenz gegenüber Windlasten auf, während geschützt stehende Bäume viel anfälliger sind (Burschel 1990).

b) Die Lage der Bäume zueinander: Einzelbäume, kleinere Gruppen und Waldränder weisen grundsätzlich die größte Stabilität auf (Burschel 1990, Sinn 2000) und eignen sich daher gut zur Differenzierung stärkerer Sturmereignisse. Auch die Höhe, der Aufbau und die Artenzusammensetzung der Gruppen und Waldränder haben einen großen Einfluss auf die Stabilität und müssen beachtet werden.

c) Bestandscharakteristika, wie Bestandsart- und -aufbau, Bestandsalter, Einfluss der Bestandesbehandlung, z. B. Durchforstungszustand (Abetz 1991) und Baumartenzusammensetzung eignen sich gut zur Differenzierung schwächerer Sturmereignisse. Grundsätzlich sind Waldbestände, die aus dicht stehenden, kleinkronigen Bäumen mit hohen h/d-Werten (>80) - (h/d-Wert = Baumhöhe in Relation zum Durchmesser in 1.3 m Höhe, dem „Brusthöhendurchmesser“ BHD) - aufgebaut sind, sturmgefährdeter als solche, die aus großkronigen Individuen mit kleinen h/d-Werten bestehen. Einzelne, aus dem Waldbestandsdach herausragende Bäume sind oftmals besonders sturmgefährdet (z. B. Woelfle 1937), es sei denn, sie weisen ein besonders kleines h/d-Verhältnis auf.

d) Die morphologischen Merkmale von Einzelbäumen, beschrieben in der Formigkeit von Stamm, Krone und Wurzelsystem haben einen hohen Einfluss auf die mögliche Resistenz gegenüber schweren Stürmen. Insbesondere der h/d-Wert als einfach zu bestimmende Größe eignet sich sehr gut für die Standfestigkeitseinschätzung von Bäumen (Mitscherlich 1974, Rottmann 1986, Abetz 1991, FVA Baden-Württemberg 1995, Sinn 2000). Je kleiner das h/d-Verhältnis ist, desto höher ist die Stabilität gegenüber Windlasten einzustufen.

e) Baumhöhe und -größe: Hohen Festigkeiten großer Stammdurchmesser (gesundes Holz vorausgesetzt) und großen, fest im Boden verankerten Wurzeltellern stehen aufgrund größerer

Kronenvolumina dieser Bäume überproportional große Einwirkflächen für Windlasten (Kronensegelfläche) entgegen. Darüber hinaus nimmt mit zunehmender Baumhöhe in der Regel auch die Windgeschwindigkeit, denen Bäume und vor allem höher gelegene Kronenteile ausgesetzt sind, zu.

f) Baumart: Zwischen den Baumarten gibt es große Festigkeitsunterschiede, die von der Holzfestigkeit, der Wurzelbildung, der Schaft- und Kronenform und der Art der Verzweigung (Einfluss auf den Widerstandsbeiwert c_w) abhängen (Sinn 1992). Im Allgemeinen sind Laubbäume, auch im belaubten Zustand und damit auch während der Vegetationsperiode sturmfester als Nadelbäume (Burschel 1990). Im Winter ist der Festigkeitsvorteil von Laubbäumen gegenüber den Nadelbäumen noch deutlicher, da erstere aufgrund des dann nicht vorhandenen Laubes einen geringeren Widerstandsbeiwert aufweisen.

Holz- oder Wurzelfäulen sowie andere Defekte im Holz sind extrem wichtige Kriterien einer Verminderung der Resistenz von Bäumen gegenüber Windlasten (Schmid-Haas et al. 1991). Steyrer und Tomiczek (1999) konnten dies erstmals anhand von Umziehversuchen mit Messwerten belegen, die für gesunde Bäume um mehr als 65% über denjenigen mit Wurzelfäulen lagen. Gaffrey (2002) maß aufgrund umfangreicher Simulationsberechnungen an einer 64-jährigen Douglasie dem Verlust tragenden Gewebes infolge von Fäule die weitaus größte Bedeutung der simulierten Faktoren zu. Der Verfasser hat ebenfalls in zahlreichen eigenen Beobachtungen die Feststellung gemacht, dass bei schwächeren Ereignissen im T1- und T2-Bereich Bäume mit Holzfäulen gebrochen waren, während offensichtlich gesunde Bäume stehen blieben. Darüber hinaus weisen bestimmte Merkmale (Defekte) am Baum auf eine nicht mehr genügende Standfestigkeit hin (Mattheck und Breloer 1994, Sinn 2000). Im Falle des Vorkommens solcher Merkmale können Bäume bereits bei Stürmen im T1 oder gar T0-Bereich versagen.

Bei der Wurzel als Verankerungssystem des Baumes muss neben der Morphologie (Pfahl-, Herz- oder Senkerwurzelsystem) beachtet werden, wie tief und wie groß diese im Verhältnis zur Baumkrone ist und ob eine intensive, mit viel anhaftender Erde erkennbare Durchwurzelung vorhanden ist, oder sich größere Lücken zwischen den Grobwurzeln befinden. Im allgemeinen bieten Pfahlwurzeln eine bessere Verankerung als Herzwurzeln und diese eine bessere als Senkerwurzeln. Eine intensive Durchwurzelung mit viel anhaftender Erde zeigt eine gute Vernetzung des Baumes mit der Matrix Boden an. Grundsätzlich gilt folgende Regel: Je tiefer ein Wurzelsystem in die Erde reicht und je schwerer dieses in Relation zur Baumhöhe und Kronenvolumen ist, desto fester ist der Baum verankert

(Bibelriether 1966, Rottmann 1986 Sinn 1993). Einen guten Überblick über die Interaktionen zwischen Wurzeln und Standort und die daraus resultierende Standsicherheit geben Sinn (1993), sowie Wessolly und Erb (1998).

Zur Beurteilung der Verankerungsfestigkeit von Bäumen im Boden muss neben dem Wurzelsystem folgendes betrachtet werden: Vorhandensein und Stärke von Grund- und/oder Stauwassereinfluss, Bodentyp, Bodenarten, Anteil größerer Steine und/oder Blöcke und die Möglichkeit, in Felsspalten des anstehenden Gesteins zu wurzeln. Stärker wasserbeeinflusste Standorte bieten den Bäumen grundsätzlich weniger Halt. Zum einen, weil die meisten Baumarten auf diesen Standorten weniger tief wurzeln, zum anderen weil diese Standorte oftmals wassergesättigte, somit aufgeweichte und damit labile Böden besitzen. Manche Baumarten, wie Flatterulme, Stieleiche und Esche bilden auf diesen Standorten Brettwurzeln und erhöhen so ihre Festigkeit (Sinn 1993). Auch auf allen skelettarmen Böden mit überwiegend feinen Bodenarten (wo Schluff- oder Tonfraktionen überwiegen) ist von einer Bodenaufweichung und damit Labilisierung bei starken oder langanhaltenden und damit ergiebigen Niederschlägen auszugehen (Volk 1968, Weidenbach 1991). Grobskelettreiche oder felsige, aber klüftige und tief durchwurzelbare Standorte bieten Wurzeln die besten Verankerungsmöglichkeiten und sind damit am stabilsten. Der Standort hinsichtlich der Verankerungsmöglichkeit von Bäumen im Boden eignet sich gut zur Differenzierung schwächerer Sturmereignisse. Bei stärkeren Stürmen tritt ein Nivellierungseffekt zwischen labilen und stabilen Standorten ein (Otto 2000).

4 Schadensanalysen, eigene Fallstudien

Eine Extrapolation von Messwerten schwächerer Baumschäden hin zu erheblichen Gebäude- und schweren bis totalen Baumschäden ist im Einzelfall möglich (Hubrig 1999, [2001](#)). Von der Gewitterfront am Abend des 29. Juni 1997, die mit schweren lokalen Stürmen von Nordostbayern über westliche Teile Thüringens, das südöstliche Niedersachsen bis in den Raum nördlich Celle zog, lagen kaum Windmessungen aus den Bereichen intensiver Sturmschäden vor. Im Bereich Peine-Celle-Soltau entstanden an Gebäuden verbreitet T2 und T3, vereinzelt auch T4-Schäden (z. B. Einsturz von Scheunen). Daher sind auch die maximalen Waldschadensintensitäten dort auf mindestens T4 zu veranschlagen. Eine gemessene Böe mit 122 km/h in Celle-Wietzenbruch befand sich zwar am Rande eines Hauptschadenkorridors, aber im Bereich deutlich geringerer Schäden (T1-T2). Diese ähnelten dem in Bild 2 gezeigten (in T2 eingeordneten) Downburstschaden in einem mittelalten

Fichtenbestand. Die vereinzelt beigemischten Birken und Kiefern überstanden das Ereignis fast unbeschadet. Auf diesem Bild ist nestweiser Wurf-, Bruch- und Druckschaden zu sehen.

In Braunschweig, bereits außerhalb irgendwelcher Hauptschadenkorridore, wurden 109 km/h gemessen. Auch dort traten nur geringe Schäden auf, die sich T1 zuordnen lassen. Bild 1 gezeigten Schäden ähneln. Bild 1 zeigt einen T1 Tornadoschaden an Fichten im geringen Baumholzalter, die auf grundwassernahem Standort stocken. Die flachen Wurzelteller der beiden aus dem Boden gehobenen Fichten deuten auf eine schwache Verankerung im Boden hin. Der Einzelwurf erfolgte an einer Bestandesgrenze zwischen dem Fichten- und einem Buchenbestand, wo das Stützgefüge unterbrochen ist.

Am selben Tage ereignete sich im Eichsfeld und Südharz (zwischen Leinefelde und Seesen) ein schwerer Downburst. Dort gab es Gebäudeschäden im T3-Bereich, vereinzelt auch bis T4. Bild 3 zeigt einen T3 Downburstschaden in einem Buchen-Altholz. Der Schaden trat am Rand einer T4 Schadensschneise auf. Im Gegensatz zum Schneisenzentrum mit nivellierenden Totalschäden sind hier einige Bäume stehen geblieben. Diese weisen allerdings größtenteils Druckschäden in Form irreversibler Faserbrüche und Rissen im Holz auf. Für viele, auch als sturmfest geltende Waldbestände, die nivellierende Totalschäden erlitten haben, ist aufgrund der Exposition von Windintensitäten bis T4 auszugehen. Bild 4 zeigt solch einen nivellierenden T4 Downburstschaden in einem als stabil geltenden Stieleichen-Hainbuchenbestand. Lediglich einige Randbäume haben den Sturm, wenn auch stark beschädigt, überstanden (in der Krone oft zerrissen). Die Mehrzahl der Bäume des Bestandes wurde geworfen, die stehengebliebenen erlitten Stamm- oder Kronenbrüche. Wie die geworfene Eiche im Vordergrund von Bild 4 zeigt, waren überwiegend Herzwurzeln zu finden, die bis in 2 m Tiefe reichten.

Als Indikator zur Abgrenzung zwischen T4, T5 und noch höheren Intensitäten eignen sich stabile Waldränder oder Einzelbäume, die eine noch höhere Sturmfestigkeit als dieser Bestand aufweisen. Stabile Waldränder blieben dort intakt, wenn auch einzelne Individuen nicht standhalten konnten und viele Individuen schwere Schäden (Ast- und Kronenbrüche) erlitten.

Ebenfalls am 29.06.1997 traten östlich von Bissendorf bei Osnabrück zwei Tornados auf, von denen der stärkere aufgrund mehrerer Gebäudeschäden in T5 eingestuft wurde. Auch hier erlitten selbst sturmfeste Wälder nivellierende Totalschäden. Bild 6 zeigt einen T5 Tornadoschaden in einem stabilen Stieleichen-Buchenbestand. Im Kern des Trombenwirbels widerstand kein Waldbaum der Windlast. Selbst der Zwischen- und Unterstand wurde zerstört.

Weitere vergleichende Betrachtungen zwischen Gebäude- und Baumschäden konnte der Verfasser nach Schadereignissen beispielsweise am 06. Juni 1998, 09. September 1998, 01. Oktober 2001, 09. Juli 2002, 31. Juli 2002, 19. April 2003 und in mehreren weiteren Fällen indirekt über Fotos ziehen. Diese Fallstudien bestätigten die hier vorgestellten Analysen und waren ein erster Schritt zu den in Tab. 2 wiedergegebenen Abstufungen von Sturmschäden als Funktion der F und T-Skala.

5 Fallstudien und baumstatische Untersuchungen anderer Autoren

Ursachen für Sturmschäden an Bäumen sind neben der Windgeschwindigkeit und den daraus resultierenden Druck- und Sogkräften die Böigkeit und Dauer des Windes (zusammenfassende Betrachtung bei Hubrig 1999). Mit zunehmender Windgeschwindigkeit tritt insbesondere der Faktor Dauer zurück. Nach Gravenhorst et al. (1991) reicht bei starken Stürmen hauptsächlich der Betrag der Windgeschwindigkeit aus, um Schäden zu verursachen. Einwirkdauer und Anströmrichtung des Windes sind bei starken Stürmen von untergeordneter Bedeutung für die Ursache intensiver Sturmschäden. Für weniger sturmfeste Bäume auf labilen Nassstandorten sind Dauer und Stärke der Böen von entscheidender Bedeutung (Hütte (1967). Gravenhorst (1991) spricht hier von der Staudruckdosis, einer Resultierenden aus den Beträgen Dauer und Windgeschwindigkeit. Ohne exakte Werte zu nennen, geht aus seiner Untersuchung hervor, dass die Intensitäten, innerhalb derer es überwiegend zu Schäden durch Staudruckdosis kommt, im T1-Bereich liegen. Es handelt sich somit um schwächere Stürme, oberhalb dessen Schwellenwert es zu definierten Sturmschäden kommt, wobei der Faktor Zeit mit zunehmender Spitzengeschwindigkeit der Böen immer geringere Bedeutung für das Auftreten von Sturmschäden hat und umgekehrt. Damit sind diese eher für die Betrachtung von schwächeren Stürmen durch länger andauernde, extratropische Zyklonen, als für kurzzeitig wirkende Downbursts oder Tornados von Bedeutung. Auch Hütte (1967) gelangte bereits zu der Erkenntnis, dass auf trockenen Standorten, die eine feste Verankerung von Wurzeln ermöglichen, das Ausmaß der Schäden vor allem von der Stärke einzelner Spitzenböen abhängt, während die Dauer des Sturmes (und damit die Staudruckdosis) von untergeordneter Bedeutung ist. Aufgrund eigener Beobachtungen (Hubrig 1999) ist dies oberhalb des T2-Intensitätsbereichs gegeben, denn hier treten vermehrt schwere Sturmschäden (z.B. Stammbruch gesunder und stabiler Bäume) auch auf stabilen Standorten auf.

Vergleiche zwischen eingetretenen Gebäudeschäden und Baumschäden finden sich auch in der Literatur: In der Nacht vom 14. auf den 15. Mai 1958 und am 1. Aug. 1958 fanden im Thüringer Wald und angrenzenden Gebieten schwere Sommersturmereignisse statt, bei denen Windgeschwindigkeiten bis 180 km/h, also der obere T3-Bereich registriert wurden (Henkel 1960). Den Schadenbeschreibungen nach traten verbreitet T3, in einigen Bereichen auch T4-Schäden auf. Insbesondere die Beschreibung von Gebäudeschäden weisen bis auf mindestens T4-Intensitäten hin. Nimmt man an, dass aufgrund der geringen räumlichen Messdichte einerseits nicht die Maximalböen registriert wurden, andererseits in Kronenhöhe der Bäume noch höhere Windgeschwindigkeiten als in 10 m Messhöhe geherrscht haben (vgl. Otto 2000), entsprechen diese Beispiele der T4 Definition.

Müldner (1950) gab für die schweren Downbursts vom 22. Juli 1948 im Reichswald bei Nürnberg eine Abschätzung der kritischen, d. h. schadenbringenden Windgeschwindigkeit aus der wirksam gewordenen Windkraft anhand dreier gebrochener Kiefern. Dabei erhielt er Windgeschwindigkeiten von 57, 58 und 65 m/s. Aufgrund dieser Werte nahm er 60 m/s an. Auch wenn er die dynamischen Reaktionen der Baumkrone bei sich erhöhender Windgeschwindigkeit nur qualitativ durch eine kleinere, aber undurchlässige Kugel berücksichtigte, sind die Werte von der Größenordnung her plausibel. Diese liegen im oberen Bereich von T4 und unterstützen die T4/F2-Einstufung sowohl aufgrund der im Reichswald aufgetretenen Schäden, als auch derjenigen, die an Bauwerken in der Umgebung aufgetreten waren.

Wegener (1917), beschreibt den verheerenden Hainichen-Tornado (T10/F5) vom 23.4.1800 im Erzgebirge (Sachsen). Dieser Tornado zerstörte stabil gemauerte Häuser völlig und entrindete stehen gebliebene Stammteile total. Beides sind nach Fujita F4 oder F5-Kriterien, die totale Entrindung deutet nach TORRO auf mindestens T9 hin. Für den ebenfalls verheerenden Pforzheimer Tornado von 10. Juli 1968 (T8/F4) lassen sich auf einem Foto (Windolf 1983) zwei stehen gebliebene Baumstämme finden, die teilweise entrindet sind – nach Fujita ein F4 Kriterium.

In Einzelfällen finden sich sogar Windgeschwindigkeitsmessungen, die gut mit den in Tabelle 1 gemachten Aussagen korrespondieren: Am 10. Juli 2002 wurde in Berlin-Wannsee während eines Gewittersturmes eine 152 km/h Bö registriert. Mehrere andere Stationen registrierten Böen im T2-Bereich. Diese Messungen passen gut zu den beobachteten Wald- bzw. Baumschäden, die nach zahlreichen Bildberichten in Zeitungen, im Internet und dem Beitrag von Kilz u. Maximini (2002) maximal T3-Intensität erreichten.

Aufgrund seiner Untersuchungen zum schweren Orkan vom 13. Nov. 1972 und der großen Erfahrung in Niedersachsen mit schwächeren und mittleren Stürmen hat Otto (2000) Schwellenwerte der Windgeschwindigkeiten für bestimmte Schadbilder genannt. Allerdings verwendete er nur 3 Stufen, deren Schwellenwerte oberhalb 90, 110/120 und 160/170 km/h liegen. Für ein in dieser Untersuchung T4 zuzuordnendem Schadbild nannte er Windgeschwindigkeiten oberhalb 160/170 km/h. Bei einem Vergleich von Waldschäden mit gemessenen Windgeschwindigkeiten ist zu beachten, dass diese in Deutschland gemäß der WMO-Norm überwiegend in 10 m Höhe ermittelt wird. Die aerodynamisch wirksame Kronenhöhe vieler Bäume liegt jedoch in 20-30 m Höhe, teilweise noch darüber. Damit wirken auf diese tatsächlich höhere Windgeschwindigkeiten als die gemessenen. Otto (2000) kommt in Analogieschlüssen für Spitzenböen von 170 km/h in 10 m Höhe im Kronendach bei 25 bis 35 m hohen Bäumen auf Werte bis zu 204 km/h. Daher werden die von Otto (2000) für Windgeschwindigkeiten oberhalb 160/170 km/h zugeordneten Schäden tatsächlich eher durch Winde von T4-Intensität verursacht.

Gaffrey (2002) sowie Gaffrey u. Kniemeyer (2002) beschreiben die Ergebnisse umfangreicher Simulationen an einer 64 Jahre alten Douglasie. Da die Bruchgrenzwerte des zu untersuchenden Stammes nicht zerstörungsfrei bestimmt werden können, Literaturwerte aufgrund der inhomogenen, für jedes Baumindividuum unterschiedlichen Holzeigenschaften aber nur Näherungswerte sind, ist eine exakte Einschätzung der Bruchsicherheit von Bäumen demnach nicht möglich. Für eine Beurteilung der Bruchsicherheit in der Praxis sind entsprechend große Sicherheitszuschläge einzubeziehen. Anzumerken ist, dass mit dieser Methode lediglich die Bruchsicherheit des Baumschaftes, nicht die noch kompliziertere Verankerungsfestigkeit der Wurzel im Boden betrachtet wurde.

Als praxisnahe Alternative hierzu wendet Sinn (1991) ein kombiniertes Zug/Dehnungsmessverfahren an: Mittels einer bis zur Windstärke Beaufort 8 entsprechenden Belastungsmethode (Neigungsmessung zur Standsicherheitsüberprüfung) und Setz-Dehnungsmessung zur Bruchsicherheitsüberprüfung per Seil und Greifzug werden die Reaktionen des Baumes gemessen. Die Belastungsprüfung erfolgt in der für am ungünstigsten angenommenen Richtung. Die so ermittelten Werte werden auf eine Windbelastung von 35 m/s entsprechend Beaufort 12 extrapoliert, wobei nur der Staudruck ($\sim v^2$) betrachtet wird. Die für die angenommene Windbelastung zu bestimmende Kronensegelfläche wird mittels einer digitalen Auswertung vorher aufgenommener, möglichst verzeichnungsfreier Kronenfotos vorgenommen. Sowohl Bruch-, als auch Wurffestigkeit lassen sich mit dieser Methode für die Praxis hinreichend genau bestimmen. Bei einer Vielzahl von bisher

durchgeführten Versuchen an mehr oder weniger freistehenden Stadt- und Parkbäumen zur Standfestigkeitsbestimmung kommt Sinn zu sehr unterschiedlichen Standsicherheiten: Die Streubreite reicht von Bäumen, die schon unterhalb der Orkanschwelle nicht mehr standsicher sind, bis zu Individuen, die rechnerisch auch der mehrfachen Belastung eines Orkans mit 35 m/s standhalten. Im Falle einer 500-jährigen, 2 m starken Eiche mit einem extrem niedrigen h/d-Wert von 8 wird eine 10-fache Orkansicherheit angegeben. Dies bedeutet, dass diese Eiche (allerdings nur als entrindeter, weitgehend astloser Stamm) sogar bei einer Windgeschwindigkeit von 110 m/s (T9/F4) stehen bleiben würde. Da beim Abreißen der Äste der Widerstandsbeiwert des stehen bleibenden Stammes viel stärker abnimmt als simuliert, ist davon auszugehen, dass solch ein Baum als entrindeter Stammtorso auch T10 oder T11-Winden (F5) widersteht.

Gaffrey u. Kniemeyer (2002) bemerken, dass diese Untersuchungsmethodik nicht unumstritten ist: Um zerstörungsfrei arbeiten zu können, wird nur bei simulierter Windstärke 8 gemessen und extrapoliert, welche Dehnungen sich bei Windstärke 12 ergeben würden. Die Kraftübertragung erfolgt in der Regel nur auf einen Punkt des Stammes. Eine realistische Verteilung der Kraft auf die gesamte Krone ist so nicht möglich. Aussagen über das elastische Verhalten des Stammes sind daher nur für den Abschnitt der Krafteinleitung zu treffen. Eine weitere Unsicherheit besteht in der Annahme der tatsächlichen Windlast: Während die Bestimmung der Kronensegelfläche nach Angaben von Sinn (1991) mit nur 3 % Ungenauigkeit behaftet ist, müssen für die Annahmen zur Verringerung der Kronensegelfläche und des Widerstandsbeiwertes bei zunehmender Windgeschwindigkeit größere Fehler vermutet werden.

6 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Die Synthese aus eigenen Untersuchungen und langjährigen Beobachtungen im Gelände, diverser Fallstudien und Schadenanalysen aus der Literatur, wissenschaftlicher und praxisorientierter Einzelbetrachtungen führt schließlich zu der aus Tabelle 1 abgeleiteten Tabelle 2, die erstmals differenziert zeigt, welche Baum- bzw. Waldschäden bei welchen T- bzw. F-Intensitäten auftreten und stellt diese einer verbalen Beschreibung entsprechender Gebäudeschäden gegenüber. Die Beschreibung von Gebäudeschäden beruht auf der 1976 von Meaden veröffentlichten TORRO-Intensitätsskala, die von Dotzek et al. (2000, 2001) für mitteleuropäische Bedingungen modifiziert wurde.

Während die Tabelle 1 sogar Windintensitäten unterhalb von Beaufort 8 berücksichtigt – unterkritische (*subcritical*) Tornados mit negativer F- oder T-Skala, die auf Beobachtungen sehr schwacher und kurzlebiger Ereignisse beruhen, die zu keinen Schäden führten - beginnt Tabelle 2 mit Beschreibung von Windschäden ab T0-Intensität. Eine Betrachtung möglicher Vegetationsschäden unterhalb von Beaufort 8 - sofern dort überhaupt erkennbare entstehen - erscheint wegen ungenügender Beurteilungsmöglichkeiten hinsichtlich der Ursachen, z.B. dem zufälligen Abbrechen von Totästen oder den Absprüngen kleiner Zweige oder Blätter, in der Praxis nicht sinnvoll.

Ein momentaner Nachteil dieser Untersuchung besteht darin, dass der stärkste bisher vom Verfasser untersuchte Schadenfall lediglich die Intensität T5, bzw. F2 aufgewiesen hat. Für stärkere Intensitäten (die in Deutschland statistisch gesehen nur alle paar Jahre auftreten; siehe [Dotzek et. al. 2003](#)) mussten die Angaben in der Tabelle 2 extrapoliert werden.

Als generelle Erkenntnis kann der Schluss gezogen werden, dass sich höhere geschlossene Waldbestände nur bis T4 oder T5-Intensität als Indikator eignen, da diese ab dieser Intensität vollständig zerstört werden. Stabile Einzelbäume und Waldränder erlauben auch noch eine Differenzierung über T4 hinaus bis mindestens T6. Als Kriterium für sehr hohe Intensitäten (ab T8/F4) gilt die Entrindung, so dass bei Vorhandensein unterschiedlich stabiler Vegetationsformen eine nahezu lückenlose Differenzierung bis von T0 bis T9 (totale Entrindung) möglich ist.

Literatur

- Abetz, P. (1991): Sturmschäden aus waldwachstumskundlicher Sicht. *Allgem. Forst Zeitschr.*, 46, 626-629.
- Bibelriether, H. (1966): Die Bewurzelung einiger Baumarten in Abhängigkeit von Bodeneigenschaften. *Allgem. Forst Zeitschr.*, 21, 808-815.
- Burschel, P. (1990): Erfahrungen aus dem großen Sturm in Südost-England im Oktober. *Allgem. Forst Zeitschr.*, 45, 942.
- Dotzek, N. (2001): Tornadoes in Germany. *Atmos. Res.*, 56, 233-251. [Available at www.tordach.org]
- Dotzek, N., G. Berz, E. Rauch u. R. E. Peterson (2000): Die Bedeutung von Johannes P. Letzmanns „Richtlinien zur Erforschung von Tromben, Tornados, Wasserhosen und Kleintromben“ für die heutige Tornadoforschung. *Meteor. Zeitschr.*, 9, 165-174. [Available at www.tordach.org]

- Dotzek, N., J. Grieser u. H. E. Brooks (2003): Statistical modeling of tornado intensity distributions. *Atmos. Res.*, in press. [Available at www.tordach.org]
- Fujita, T. T. (1981) Tornadoes and downbursts in the context of generalized planetary scales. *J. Atmos. Sci.*, 38, 1511-1534.
- Fujita, T. T. u. A. D. Pearson (1973): Results of FPP classification oft 1971 und 1972 tornadoes. *Proc. 8th Conf. on Severe Local Storms*, Denver, 142-145.
- Gaffrey, D. (2002): Die Bedeutung baumspezifischer Merkmale sowie weiterer Einflußgrößen für das Biegeverhalten des Stammes – Möglichkeiten und Grenzen von Sicherheitsprognosen. *20. Osnabrücker Baumpflegetage*, Osnabrück, Sept. 2002. [PDF file: www.uni.gaffrey.de]
- Gaffrey, D., u. O. Kniemeyer (2002): The elasto-mechanical behaviour of Douglas fir, its sensitivity to tree-specific properties, wind and snow loads, and implications for stability—a simulation study. *J. Forest Sci.*, 48, 49-69. [PDF file: www.uni.gaffrey.de]
- Gravenhorst, G., J. Giesemann u. H. Kreilein (1991): Feststellung von Beziehungen zwischen Sturmschäden und außergewöhnlichen meteorologischen Einflüssen im „Vorderen Hunsrück“. *Endbericht des Teilprojektes „Sturm- und Immissionsschäden im Vorderen Hunsrück (SIMS)“*. Inst. f. Bioklimat., Forstwiss. Fak. Univ. Göttingen. 115 S.
- Henkel, W. (1960): Untersuchung über die Sturmschadenkatastrophe im StFB Sonneberg/Thüringen im Jahre 1958. *Arch. f. Forstwesen*, 9, 29-46.
- Hubrig, M. (1999): *Dokumentation der Sturmschäden vom 29.6.1997 in Niedersachsens Wäldern, verursacht durch „Schwere Lokale Stürme“*. Mitt. d. Niedersächs. Landesforstverw., Aus dem Walde, 52 I, 135 S.
- Hubrig, M. (2001): Tornado- und Downburst-Schadenskala für Holzgewächse basierend auf der Skalierung nach TORRO angepasst für Mitteleuropa (TorDACH). *2nd Forum Katastrophenvorsorge*, Leipzig, Sept. 2001. [Available at www.tordach.org]
- Hütte, P. (1967): Die standörtlichen Voraussetzungen der Sturmschäden. *Forstwiss. Centralblatt.*, 86, 276-295.
- Kilz, E., u. A. Maximini (2002): Sturm in Berlin. *AFZ/DerWald*, 57, 21, 1145-1146.
- Kremser, W. (1977) *Dokumentation der Sturmkatastrophe vom 13. Nov. 1972*. Mitt. d. Niedersächs. Landesforstverw., Aus dem Walde, 27, 11-23.
- Mattheck, C. (1992): Mechanisches Versagen von Bäumen durch Windbruch. *Physik in unserer Zeit*, 23, 79-83.

- Mattheck, C., u. H. Breloer (1994): *Handbuch der Schadenskunde von Bäumen - der Baumbruch in Mechanik und Rechtsprechung*. 2. Auflage, Rombach Verlag, Freiburg, 249 S.
- Meaden, G. T. (1976): *Tornadoes in Britain: Their intensities and distribution in space and time*. J. Meteor. 1, 242-251.
- Mitscherlich, G. (1974): Sturmgefahr und Sturmsicherung. *Schweiz. Zeitschr. Forstwesen*, 125, 199-216.
- Müldner, W. (1950): Die Windbruchschäden des 22. 7. 1948 im Reichswald bei Nürnberg, ein Beispiel für ein Wirbelfeld als Teilerscheinung einer Böenfront. *Ber. DWD US-Zone*, 3, 19, 1-29.
- NOAA-NWS (Ed.) (2003): *A Guide to F-Scale Damage Assessment*. U.S. Department of Commerce, 101 S. [PDF file: <http://meted.ucar.edu/resource/wcm/ftp/FinalNWSF-scaleAssessmentGuide.pdf>]
- Otto, H.-J. (2000): Waldbauliche Erfahrungen nach Sturmkatastrophen – eine Rückschau in Niedersachsen. *Forst und Holz*, 55, 371-376.
- Rottmann, M. (1986): *Wind- und Sturmschäden im Wald*, Frankfurt a. M: J. D. Sauerländer's Verlag, 128 S.
- Schmid-Haas, P., u. H. Bachofen (1991): Die Sturmgefährdung von Einzelbäumen und Beständen. *Schweiz. Zeitschr. Forstwesen*, 142, 477-504.
- Sinn, G. (1991): Meßmethoden zur Stand- und Bruchsicherheit von Bäumen. *Das Gartenamt*, 40, 12, 794-800.
- Sinn, G., u. T. Sinn (1992): Anpassungsmechanismen von Bäumen an hohe Windgeschwindigkeiten – Verringerung der Windangriffsfläche. *Das Gartenamt*, 41, 3, 143-144.
- Sinn, T. (1993): Zum Einfluß des Bodens auf die Standsicherheit von Bäumen. *Das Gartenamt*, 42, 7, 454-458.
- Sinn, T., 2000: Biostatische Baumkontrolle. Teil 2 – Weitere eindeutige Schadsymptome und ihre Bedeutung für die Baumstatik. *Stadt und Grün*, 49, 9, 625-633.
- Steyrer, G., u. C. Tomiczek (1999): Bruch- und Wurfgefahr bei Wurzelfäule. Ergebnisse eines Umziehversuchs an Fichten. *Forstl. Bundesversuchsanstalt*, Wien, 4 S. [Internet: <http://fbva.forvie.ac.at/inst4/integrierter-fs/windwurf/wurzelfaeule.html>]
- Volk, K. (1968): Über die Sturmschäden in Südbaden., *Allgem. Forst u. Jagd Zeitschr.*, 9, 45-56.

- Wegener, A. (1917): *Wind- und Wasserhosen in Europa*. Verlag Vieweg und Sohn, Braunschweig, 301 S.
- Weidenbach, P. (1991): *Die Wiederbewaldung der sturmgeschädigten Waldflächen. Die Orkanshäden 1990 – Ursachen und Folgerungen*. Wilhelm-Münker-Stiftung, 33, 44 S.
- Wessolly, L., u. M. Erb (1998): *Handbuch der Baumstatik und Baumkontrolle*. Patzer Verlag, Berlin, 272 S.
- Windolf, R. (1983): Wenn Winde Wirbel machen. *Kosmos*, 2, 41-49.
- Woelfle, M. (1936): Sturmschäden im Walde. I. Mitteilung. *Forstwiss. Centralblatt*, 58, 605-617.
- Woelfle, M. (1937): Sturmschäden im Walde. III. Mitteilung (Schluß). *Forstwiss. Centralblatt*, 59, 565-588.

FDK: 421

Privat-Forststrat Martin Hubrig ist freiberuflich als forstfachlicher Dienstleister tätig.

Anschrift des Autors:

Röckwitzer Str. 11, 49326 Melle

eMail: martin.hubrig@forstexperte.de

Tab. 1: Übersicht der Fujita- (F) und TORRO- (T) Skala. Zum Vergleich sind die zugehörigen Beaufortstärken und die Geschwindigkeiten mit angegeben. Die Schadensätze S für Leicht- und Massivbauten für Mitteleuropa stammen von Dotzek et al. (2000), die verbalen Intensitätsabstufungen folgen Kelly et al. (1978) und Dotzek et al. (2003).

	Unterkritisch (Subcritical)				Schwach (Weak)			
Fujita	F-2		F-1		F0		F1	
TORRO	T-4	T-3	T-2	T-1	T0	T1	T2	T3
Beaufort	0	2	4	6	8	10	12	14
v in m s^{-1}	0 – 3	3 – 7	7 – 12	12 – 18	18 – 25	25 – 33	33 – 42	42 – 51
Δv in m s^{-1}	3	4	5	6	7	8	9	9
v in km h^{-1}	4 ± 4	16 ± 8	34 ± 10	56 ± 12	76 ± 14	104 ± 14	135 ± 16	167 ± 16
\bar{S}_- in %	0.0	0.0	0.0	0.01	0.05	0.10	0.25	0.80
\bar{S}_+ in %	0.0	0.0	0.0	0.0	0.01	0.05	0.10	0.25
	Signifikant (Significant)							
	Stark (Strong)				Verheerend (Violent)			
Fujita	F2		F3		F4		F5	
TORRO	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11
Beaufort	16	18	20	22	24	26	28	30
v in m s^{-1}	51 – 61	61 – 71	71 – 82	82 – 93	93 – 105	105 – 117	117 – 130	130 – 143
Δv in m s^{-1}	10	10	11	11	12	12	13	13
v in km h^{-1}	202 ± 18	238 ± 18	275 ± 20	315 ± 20	356 ± 22	400 ± 22	445 ± 23	491 ± 23
\bar{S}_- in %	3.0	10.0	30.0	90.0	100	100	100	100
\bar{S}_+ in %	0.80	3.0	10.0	30.0	60.0	80.0	90.0	95.0

Tab. 2: Typische Sturmschäden in Mitteleuropa als Funktion der F- und T- Skala.

T	F	Waldschäden	Gebäudeschäden
0	0	Einzelne Äste beginnen abzubrechen. Kranke (z. B. Holzfäulen) oder besonders labile Bäume (lange dünne Stämme, hoch angesetzte Krone, geringes, flaches Wurzelwerk) können brechen oder entwurzelt werden (bei Wurzelfäulen und/oder auf labilen, durchnässten Standorten).	$S_- = 0,05 \%$, $S_+ = 0,01 \%$ Leichte Gegenstände werden vom Boden abgehoben. In Getreidefeldern ist der Zugweg erkennbar. Baugerüste können umstürzen, leichte Schäden an Markisen und Zelten auftreten. Dachziegel an exponierten Stellen können sich lockern. Keine Schäden an Gebäude-Tragwerken.
1	0	Äste, auch starke und gesunde brechen vermehrt, insbesondere während der Vegetationszeit, in der Laubbäume belaubt sind. Kranke (z. B. Holzfäulen) oder besonders labile Bäume (lange, dünne Stämme, hoch angesetzte Krone, geringes, flaches Wurzelwerk) brechen häufig oder werden entwurzelt. Bäume mit Wurzelschäden/fäulen oder auf labilen, durchnässten Standorten werden häufig geworfen.	$S_- = 0,10 \%$, $S_+ = 0,05 \%$ Gartenmöbel und leichtere Gegenstände werden umgeworfen und können durch die Luft gewirbelt werden. Holzzäune können umgeworfen werden. Leichte Schäden an Dächern (Dachziegel und Verblechungen können sich lösen und herabgeweht werden). Geringe Schäden an Leichtbauten; keine strukturellen Schäden.
2	1	Zahlreiche auch starke und gesunde Äste brechen, insbesondere während der Vegetationszeit (Laubbäume belaubt). Bäume mit Holzfäulen oder sonstigen statisch relevanten Schäden, labile Bäume (ungünstige H/D-Werte, geringes oder flaches Wurzelwerk) oder Bäume auf labilen Böden (stauwasserbeeinflusst oder grundwassernah) werden nahezu immer gebrochen oder entwurzelt. Auch gesunde Bäume können im Falle ungünstiger Stoßrichtungen oder Zeitpunkte der Böen bereits gebrochen oder auf witterungsbedingt durchweichenden Böden geworfen werden. Während der Zeit des Saftstromes treten an Bäumen mit stabiler Verwurzelung, aber labileren Stämmen häufiger Druckschäden auf.	$S_- = 0,25 \%$, $S_+ = 0,1 \%$ Auch schwerere Gegenstände werden vom Boden aufgehoben und können zu gefährlichen Geschossen werden. Wohnwagen und Anhänger können umgeworfen werden. Ziegel- und ungesicherte Flachdächer werden teilweise abgedeckt. Geringe bis mittelschwere Schäden an Leichtbauten; erste Schäden an strukturellen Elementen von Massivbauten möglich.
3	1	Zahlreiche Äste, auch starke und gesunde brechen; auch außerhalb der Vegetationszeit, in der Laubbäume unbelaubt sind. Auch stabile und gesunde Bäume werden vermehrt geworfen oder bereits gebrochen. Während der Zeit des Saftstromes sind Druckschäden relativ häufig. Bereits erhebliche Schäden in stabilen Waldbeständen, wobei die stabilsten Individuen, aber auch Zwischen- und Unterständige, die nur wenig Windwiderstand bieten, überwiegend noch stehen bleiben.	$S_- = 0,80 \%$, $S_+ = 0,25 \%$ Zahlreiche Wohnwagen und Anhänger werden umgeworfen. Ziegel- und ungesicherte Flachdächer erleiden größere Schäden. Mittelschwere Schäden an Leichtbauten; einzelne Schäden an strukturellen Elementen von Massivbauten. Fahrende Autos werden von der Straße gedrückt.
4	2	Auch stabile Bäume/Waldbestände werden fast immer/vollständig geworfen oder gebrochen. Großkronige Bäume werden, sofern besonders stabil verwurzelt, meistens gebrochen. Sofern Bäume noch stehen bleiben, wird die überwiegende Anzahl der Äste, auch die in unbelaubtem Zustand, abgerissen. Der Anteil an Druckschäden geht zugunsten gebrochener Bäume stark zurück.	$S_- = 3,0 \%$, $S_+ = 0,80 \%$ Große Schäden an Fahrzeugen und Anhängern. Hohe Gefährdung und Schäden durch herumfliegende Teile. Ganze Dächer werden abgedeckt. Schwere Schäden an Leichtbauten; zunehmend Schäden an strukturellen Elementen von Massivbauten, Einsturz von Giebelwänden möglich.
5	2	Auch stabilste Bäume oder Sträucher, wie Randbäume, winderprobte Hecken, Büsche und Feldgehölze werden stark geschädigt oder bereits zerstört; entweder durch entwurzeln	$S_- = 10,0 \%$, $S_+ = 3 \%$ Schwere Schäden an Dächern und Anbauten. Schwere Schäden an Leichtbauten; weiter zunehmende Schäden an strukturellen Elementen

		(herausreißen), Stamm- oder Kronenbruch oder durch abreißen der überwiegenden Zahl der Äste, insbesondere fast allen Feinreisigs.	von Massivbauten. Vollständiger Einsturz einzelner Gebäude, vor allem landwirtschaftlich genutzter Konstruktionen und Lagerhallen. Kraftfahrzeuge werden hochgehoben.
6	3	Kein heimisches Holzgewächs übersteht - falls der Stamm stehen bleibt - solch einen Sturm ohne schwerste Schäden. Stehenbleibende Bäume werden weitgehend entastet.	$S_1 = 30,0 \%$, $S_+ = 10 \%$ Leichtbauten werden in größerem Umfang zerstört. Schwere Schäden an strukturellen Elementen von Massivbauten. Einsturz einzelner Gebäude. Schwere Kraftfahrzeuge werden hochgehoben und umgeworfen.
7	3	Kein heimisches Holzgewächs übersteht - falls der Stamm stehen bleibt - solch einen Sturm ohne schwerste Schäden. Stehenbleibende Bäume oder Baumteile werden weitgehend entastet.	$S_1 = 99,0 \%$, $S_+ = 30 \%$ Verbreitet völlige Zerstörung von Leichtbauten und schwere Schäden an Massivbauten. Einsturz zahlreicher Gebäude.
8	4	Deutliche Entrindung stehenbleibender Baumstämme oder Baumteile (bedingt durch mit hoher Geschwindigkeit umherfliegende Kleintrümmer wie Sand u. ähnliches).	$S_1 = 100 \%$, $S_+ = 60 \%$ Schwere Schäden an Massivbauten. Verbreiteter Einsturz von Gebäuden, deren Einrichtung verstreut wird. Kraftfahrzeuge werden über große Strecken geschleudert.
9	4	Totale Entrindung stehenbleibender Baumstämme oder Baumteile (bedingt durch mit hoher Geschwindigkeit umherfliegende Kleintrümmer wie Sand u. ähnliches).	$S_1 = 100 \%$, $S_+ = 80 \%$ Überwiegend Totalschäden an Massivbauten. Züge werden von den Schienen gerissen.
10	5	Totale Entrindung stehenbleibender Baumstämme oder Baumteile (bedingt durch mit hoher Geschwindigkeit umherfliegende Kleintrümmer wie Sand u. ähnliches).	$S_1 = 100 \%$, $S_+ = 90 \%$ Überwiegend Totalschäden an Massivbauten.
11	5	Totale Entrindung stehenbleibender Baumstämme oder Baumteile (bedingt durch mit hoher Geschwindigkeit umherfliegende Kleintrümmer wie Sand u. ähnliches).	$S_1 = 100 \%$, $S_+ = 95 \%$ Überwiegend Totalschäden an Massivbauten. Unvorstellbare Schäden entstehen.



Bild 1: T1 Tornadoschaden an jüngerer, grundwassernah stockender Fichte. Flache Wurzelteller deuten auf geringe Verankerung im Boden hin.



Bild 2: T2 Downburstschaden in einem mittelalten Fichtenbestand, dem einzelne Birken und Kiefern beigemischt sind.



Bild 3: T3 Downburstschaden in einem Buchen-Altholz. Der Schaden trat am Rand einer T4 Schadenschneise auf.



Bild 4: T4 Downburstschaden in einem stabilen Stieleichen-Hainbuchenbestand. Hier traten nivellierende Schäden auf.



Bild 5: T5 Tornadoschaden in einem stabilen Stieleichen-Buchenbestand.