Wurzelhabitus und Standfestigkeit der Waldbäume Root habitus and wind stability of trees

Von JANINA POLOMSKI und N. KUHN

Zusammenfassung

Anhand ausgewählter Fachliteratur wird der Frage nachgegangen, wie weit Bodenversauerung und Luftverschmutzung die Wurzelsysteme der Waldbäume und deren Standfestigkeit beeinflussen.

Die Standfestigkeit der Waldbäume steht in ursächlichem Zusammenhang mit den Verankerungsbedingungen. Dies wird an den in Mitteleuropa waldbildenden und häufig von Stürmen geworfenen Baumarten Fichte (*Picea abies* [L.] Karst.) und Buche (*Fagus sylvatica* L.) dargestellt.

Der Wurzelhabitus ist in erster Linie genetisch, also durch die Baumart festgelegt. In zweiter Linie wird die Wurzelarchitektur durch Bodeneigenschaften und andere natürliche Umweltbedingungen modifiziert. Die Standfestigkeit des Baumes nimmt mit der Baumhöhe bzw. dem Alter ab. Zudem ist dafür die Bestandesausformung sowie die soziale Stellung von Bedeutung. Unter den anthropogenen Einflüssen, welche die Festigkeitseigenschaften der Wurzeln bzw. Wurzelsysteme beeinträchtigen, sind Wurzelkrankheiten, bedingt z. B. durch Bodenverdichtung, Fäll- oder Rückeschäden und andere Verletzungen von weit grösserem Einfluss als Bodenversauerung und Luftverschmutzung. Zur Feststellung einer generellen Verkleinerung der Wurzelteller/-ballen und größerer Windwurfgefährdung heutiger gegenüber früherer Waldbestände fehlen Vergleichs- und Erklärungsmöglichkeiten. Besondere Beachtung verdient – trotz Trivialität – der Umstand, dass rezente Umwelteinwirkungen die weit zurück reichende Anlage der Skelettwurzelsysteme nicht beeinflussen konnten.

Schlüsselwörter: Wurzelhabitus, Wurzelwachstum, Standfestigkeit, Windwurf, Standortsfaktoren, Bodenversauerung, Luftverschmutzung, *Picea abies*, *Fagus sylvatica*.

Summary

The present literature survey deals with the influence of soil acidification and environmental pollution on root systems and tree stability. The stability of trees under windy conditions is determined by their root anchorage. These relationships are explained using Norway Spruce (*Picea abies* [L.] Karst.) and European Beech (*Fagus sylvatica* L.) as exemplary species due to their broad distribution and frequent uprooting in Central Europe.

Although tree root architecture is genetically determined, it can be modified by soil properties and other natural environmental conditions. The wind stability of a tree decreases with increasing height and/or age. In addition, stand structure, especially the social position of an individual tree, is important. Diseases caused by soil compaction, harvesting or other human-induced injuries are far more important causes of damage to the stability of roots and root systems than damage caused by soil acidification or environmental pollution. Due to a lack of data for comparison, a general assumption in regards to the current reduction of root plates and the greater wind-throw risk as compared to earlier times is not possible. This is explained by the fact that current environmental conditions of course had no effect on the early formation of the skeleton root system responsible for wind stability.

Keywords: Root Architecture, Root Growth, Tree Stability, Wind Throw, Site Factors, Soil Acidification, Air Pollution, *Picea abies*, *Fagus sylvatica*.

1 Einführung und Zielsetzung

Die verheerenden Sturmschäden im Wald beim Durchgang des „Lothar“ genannten Sturmtiefs vom 26. Dezember 1999 haben erneut Fragen nach der Beziehung der Standfestigkeit von Waldbäumen zu ihrem Wurzelhabitus aufgeworfen. Ähnliche Fragen wurden schon im Rahmen der Waldschadensdebatte der achtziger und neunziger Jahre und den Windwürfen durch „Vivian“ und „Wiebke“ vom Februar 1990 gestellt. Die Antworten, ob und

wie sich die Luftverschmutzung auf den Gesundheitszustand der Waldbäume auswirke, sind trotz jahrzehntelanger weltweiter Forschung kontrovers geblieben, obwohl die Experimente aus den neunziger Jahren (Hypothese von Ulrich, Göttingen) oder Untersuchungen an Wurzelballen sturmgeworfener Bäume einige neuere Erkenntnisse zum räumlichen Aufbau der Wurzelsysteme ergaben. Zum negativen Einfluß des sog. sauren Regens auf das Wurzelwachstum liefern sie jedoch bestenfalls Indizien (ULRICH et al. 1984, ULRICH 1986, SCHMIDT-VOGT et al. 1987, EICHHORN 1991, SCHMID-HAAS und BACHOFEN 1991, ZOTH und BLOCK 1992, GRUBER 1994, ALDINGER et al. 1996, RIEDER 1997, WIEMKEN et al. 1997, DREXHAGE und GRUBER 1998). Lückenhaft bleibt das Wissen über die Bedeutung von Topologie, Architektur, Anatomie oder Morphologie für die Standfestigkeit vor allem in bezug auf ältere Bäume, die in windwurfgefährdete Baumhöhen einwachsen. Die Kenntnisse beruhen auf der Untersuchung weniger, zufälliger Beispiele von Windwurf-Wurzeltellern mit unvollständigen Wurzelsystemen. Die Ausgrabung intakter Wurzelsysteme ist zu aufwändig, als dies je mit der nötigen Systematik durchgeführt worden wäre. Von forstlichen Praktikern ist nach Lothar wieder die Frage gestellt worden, ob die Wurzelwerke der Bäume zufolge Luftverschmutzung und Bodenversauerung kleiner geworden seien und deshalb die Verankerung nachgelassen habe. Die Frage ist in den Medien ohne schlüssige weitere Argumente bald zur Behauptung und schließlich zur Gewissheit mutiert worden.

Mit den folgenden Ausführungen wird beabsichtigt, die häufig gehörten Meinungen und Behauptungen in den Rahmen wissenschaftlicher Ergebnisse und Erkenntnisse zu stellen.

Die Standfestigkeit bzw. Sturmanfälligkeit der Bäume ist ein komplexes Beziehungsgefüge, in dem viele und unterschiedliche Faktoren aus voneinander entfernten Wissensgebieten bedeutende Rollen spielen. Die umrissene Problematik verlangt eine spezifische Sichtweise der Beantwortung. Die Ausformung des Waldbestandes und demzufolge waldbauliche Maßnahmen spielen zwar eine bedeutende Rolle, doch sind die Zusammenhänge bekannt, weshalb hier auf die einschlägige Literatur hingewiesen wird. Vertieft werden jedoch folgende Themenbereiche behandelt:

- (a) Relevanz wachstumsbezogener und morphologischer Wurzelmerkmale für die Sturmbeständigkeit der Bäume (Kapitel 2),
- (b) Bedeutung der Hebelkräfte von Stamm und Krone für die Kräfteverteilung im Wurzelraum (Kapitel 3),
- (c) Einflüsse natürlicher und anthropogener Umweltfaktoren auf die Verankerung des Wurzelsystems (Kapitel 4).

Die vorgestellten Ergebnisse beruhen auf umfangreichen Kenntnissen der wurzelökologischen Literatur (vgl. dazu POLOMSKI und KUHN 1998), aber auch Erfahrungen von Sturmschadenflächen seit den sechziger Jahren.

2 Entwicklungsetappen und phänotypische Merkmale der Wurzelsysteme

2.1 Entwicklungsetappen der Wurzelsysteme

Im Laufe der Ontogenese eines jeden Wurzelsystems lassen sich Entwicklungsstadien unterscheiden, die von einem bestimmten Wachstumsprozeß dominiert werden. Zeitlicher Verlauf und Dauer dieser Phasen sind von genetischen sowie standörtlichen Faktoren (Kapitel 4.1) beeinflusst.

- Phase 1: Die ersten 2 bis 3 Jahre können als „Pfahlwurzel-Phase“ bezeichnet werden. Sie ist gekennzeichnet durch ein intensives Tiefen- und Dickenwachstum der Pfahlwurzel. Es ist eine wichtige Phase für die vertikale Bodenerschließung (KÖSTLER et al. 1968, EIS 1974).
- Phase 2: Während der nächsten 10 Jahre findet eine „Differenzierung“ zwischen vertikalen, horizontalen oder schrägwachsenden Wurzeln, sowie ein intensives Längen- und

Dickenwachstum der Horizontalwurzeln statt. Viele Baumarten weisen in dieser Phase eine gut entwickelte Pfahlwurzel auf, die im wesentlichen ihre endgültige Tiefe erreicht. Bei Buche oder Strobe kann hingegen die Pfahlwurzel bereits abgestorben sein.

In dieser Lebensphase weist der Baum die höchste Standfestigkeit auf. Einerseits bieten geringe Baumhöhe und Kronengröße dem Sturm eine relativ kleine Angriffsfläche, andererseits sorgt die kräftige Pfahlwurzel für ausgewogene Verteilung der Kräfte (vgl. Kap 3).

– Phase 3: Zahlreiche Baumarten wie Tanne, Fichte, Kiefer oder Eiche bilden zwischen 10 und 30 Jahren „Senker“ aus, welche die vertikale Bodenerschließung übernehmen. Das Tiefenwachstum verlangsamt sich, während die Seitenwurzeln weiter wachsen und sich intensiv verzweigen. Bei ungehemmtem Wachstum können sich die Horizontalwurzeln lebenslang ausdehnen und jederzeit neue Senker bilden, die jedoch weniger tief wachsen als die zentral lokalisierten Senker. Die Gesamtwurzeltiefe wird etwa bis zum vierzigsten Lebensjahr erreicht.

– Phase 4: Ergänzungen, Korrekturen und Absterben von Wurzelteilen kennzeichnen diese Phase. Dicken- und Längenwachstum der Horizontal- und Seitenwurzeln setzen sich fort. Neue Senker, Wurzelanläufe oder Brettwurzeln werden nach individuellem Bedarf und Standortangebot gebildet. Aus Wurzelholz jeder Dimension und jeden Alters, ähnlich der Adventivwurzelbildung am Stamm, können jederzeit neu Wurzeln entstehen.

Im höheren Alter sterben, besonders bei der Fichte auf flachgründigen Standorten, die Senker oft und die Pfahlwurzel in der Regel ab – der Stock wird tellerartig flach. Die Hauptseitenwurzeln machen nicht selten 60 bis 100 % des Gesamtwurzelsystems aus.

Die Resistenz der Wurzeln gegenüber Krankheitserregern sinkt im Alter. Als Ursachen können genannt werden: Schwächung der Wurzeln durch frühere Stürme (KLEIN 1995), verschiedene Verletzungen, z. B. an der mechanisch empfindlichen Wurzel-Stamm-Verbindung, bzw. alters- oder umweltbedingtes Absterben von Wurzelteilen. Falls ein Ersatz stattfindet, wird die ursprüngliche Standfestigkeit kaum mehr erreicht.

Fichte und Strobe sind im Gegensatz zu Kiefer und Lärche empfindlich auf Verletzungen, da in ihrem Wurzelholz die mangelhafte Harzbildung zum Verschluss der Wunden nicht hinreicht. Deswegen kommt bei der Fichte die Wurzelfäule sowohl auf sehr trockenen als auch auf frischen und feuchten Standorten häufig vor. Aufschlußreich sind die Beobachtungen von BURGER (1924), daß „Stelzenfichten“, die auf vermoderten Stöcken keimten, bis ins hohe Alter gesund bleiben, während am gleichen Ort tief gepflanzte Fichten schon in Alter von 40 bis 80 Jahren regelmäßig faule Wurzeln aufweisen. Buchenwurzeln dagegen verfügen über ein gutes Regenerationsvermögen und sind gegen Wurzelverletzung weniger empfindlich (KÖSTLER et al. 1968). Welche Bedeutung letztlich die Wurzelfäule für das Ausmaß der Windwürfe des Orkans „Vivian“ hatte, ist umstritten (LÜPKE und SPELLMANN 1997). KÖSTLER et al. (1968) machen auf die sog. „Vergreisung der Waldbäume“ als natürlichen Alterungsprozeß aufmerksam. Im Laufe des Baumlebens sterben immer wieder Wurzelteile ab und zersetzen sich, wobei die Wundstellen vernarben, d. h. von Rinde überwachsen werden.

2.2 Beziehung zwischen Wurzel und Sproß

Der ober- sowie unterirdische Teil eines Baumes sind voneinander und ihrerseits von den Umweltfaktoren abhängig. Der Baum ist bestrebt, das Gleichgewicht zwischen Sproß und Wurzeln in bezug auf Ernährung, Standfestigkeit und Materialverbrauch herzustellen und zu erhalten. Somit wirkt sich früher oder später jede Beeinträchtigung der Sproßentwicklung, z. B. wegen Kronenverlichtung, auf das Wachstum des Wurzelsystems negativ aus. Zudem verlaufen Sproß- und Wurzelentwicklung asynchron, sind artspezifisch und altersabhängig, weshalb sie sich schwerlich direkt erfassen lassen. Hingegen wurden verschiedentlich enge Beziehungen zwischen Sproß- und Wurzelwachstumsergebnis festgestellt. So beträgt nach ROLOFF und RÖMER (1989) das Wurzel/Sproß-Verhältnis (W/S) zwei Meter

hoher Jungbuchen 0,3 bis 0,4 bei einem Korrelationskoeffizienten von 0,91. Für 14- bis 19-jährige Fichten stellte GRUBER (1992) standortsunabhängig ein einheitliches W/S von 0,2 ($r = 0,96$) fest. SCHMIDT-VOGT (1977, 1989) äußert sich in verschiedenen Zusammenhängen zu dem bei ihm „Wurzelprozent“ genannten Begriff. Im Bereich von Fichten und Buchen, nämlich 0,2 bis 0,5, liegen nach EIS (1974), STRONG und LAROI (1983) die Wurzelprozent von *Tsuga heterophylla*, *Thuja plicata* und *Pseudotsuga menziesii* im Alter zwischen 23 und 57 Jahren. KÖSTLER et al. (1968) ermittelten für siebenjährige Kiefern auf Sandböden ein W/S von 0,47, während dieses für 55-jährige Kiefern noch 0,23 betrug.

In aller Regel nimmt das Wurzel/Sproß-Verhältnis, auch Wurzelprozent genannt, mit zunehmender Baumhöhe oder mit zunehmendem Alter ab.

2.3 Wurzelhabitus

Das Wurzelsystem besteht aus zwei Kompartimenten, Skelett- und Feinwurzeln (unter 2 mm Durchmesser). Die Feinwurzeln versorgen den Baum über die Skelettwurzeln mit Wasser und Nährstoffen. Die Skelettwurzeln haben außerdem die Funktion der Verankerung des Baumes im Boden und sind somit für seine Standfestigkeit zuständig. Für effiziente Verankerung sind bei den Koniferen, nach heutigem Wissensstand, einige wenige gesunde, bereits in jungen Jahren gebildete und sekundäres Dickenwachstum aufweisende Skelettwurzeln ausreichend. Die Laubbäume entwickeln gegenüber den Nadelbäumen ein intensiver verzweigtes Wurzelsystem mit zahlreichen dünneren Skelettwurzeln aus. Welche Bedeutung sie und die Feinwurzeln für die Standfestigkeit des Baumes haben, ist kaum bekannt.

Die räumliche Verteilung der Vertikal- und Horizontalwurzeln sowie ihre morphologischen und topologischen Merkmale ergeben den Wurzelhabitus. Nach diesem Kriterium sind die Wurzelsysteme einheimischer Baumarten in drei Haupttypen aufgeteilt: Pfahlwurzels-, Senker- und Herzwurzelsystem (Abb. 1). Statt Pfahlwurzel empfehlen KUTSCHERA et al. (1997) den Begriff „Polwurzel“ zu verwenden, weil diese dem Wachstumspol der Keimwurzel entstammt. Die arttypischen Merkmale des Wurzelsystems entfalten

Abb. 1. Typische Silhouetten ungehindert entwickelter Wurzelsysteme von Fichte, Tanne, Buche und Eiche.

Fig. 1. Typical silhouettes of freely-developed root systems of spruce, silver fir, beech and oak.

sich allerdings nur unter optimalen Witterungs- und Bodenbedingungen. Der ideale Wurzelphänotyp wäre als Bezugsgröße für vergleichende wissenschaftliche Untersuchungen von Bedeutung. Unter den Bedingungen der Praxis kann jedoch das Wurzelsystem nur bei vorherrschenden Bäumen in sandigen oder sonst lockeren Böden (ideal in manchen Lößböden) eindeutig den idealen Typen zugeordnet werden. Normalerweise verursachen die verschiedensten Hindernisse im Boden einen heterogenen Aufbau der Wurzelsysteme, nicht nur innerhalb des Bestandes, sondern sogar innerhalb des Wurzelsystems ein- und desselben Individuums. Außerdem nimmt der Durchmesser der Horizontalwurzeln nicht gleichmäßig mit der Distanz vom Stammzentrum ab. Die Konzentration der dicken Wurzeln ist nämlich in 1 bis 2 m Entfernung vom Stammzentrum (Zone of Rapid Tapper, ZRT,

Abb. 2. Definition und Differenzierung des Begriffs „Wurzelteller“ (Wurzelballen) (aus Kombination der Angaben von NICOLL et al. 1995 mit HELLIWELL 1989, POLWURZEL nach KUTSCHERA et al. 1997).

Fig. 2. Definition and elucidation of the term “root plate” (compiled from NICOLL et al. 1995 and HELLIWELL 1989. “Polwurzel” = tap root according to KUTSCHERA et al. 1997).

Abb. 2) am größten. Ausnahmen von dieser Regel sind je nach Baumarten und nach Standorten möglich. Außerhalb dieses Bereichs sind die Wurzeln im Querschnitt erheblich dünner. Seitenwurzeln (von 1 bis 2 cm Durchmesser) können sich auf große Distanzen ausdehnen. Aufgeworfene Wurzelteller stellen nur einen Teil des Wurzelsystems eines Baumes dar.

2.4 Wurzelhabitus speziell sturmgefährdeter Baumarten

Die klassischen Wurzelsystemtypen sind bei verschiedenen Baumarten phänotypisch unterschiedlich ausgeprägt. Hier soll auf die von Lothar in der Schweiz am stärksten betroffenen Baumarten Fichte (*Picea abies*) und Buche (*Fagus sylvatica*) näher eingegangen werden. Ihre klassischen Wurzelsysteme sind in Abbildung 1 den weniger sturmgefährdeten Baumarten Weißtanne (Tanne, *Abies alba*) und Eiche (*Quercus petraea* und *Q. robur*) gegenübergestellt. Diese sind bekannt für unflexible Pfahlwurzelbildung, auch unter sonst als ungünstig erachteten Bodenbedingungen (z. B. Vernässung). Im Vergleich damit zeigen sich Buche und Fichte geradezu als überanpassungsfähig:

Wurzelhabitus der Fichte

Die Hauptstruktur des Wurzelwerkes, ein Senker-Wurzelsystem mit klarer Trennung zwischen Horizontal- und Vertikalwurzeln, bleibt unabhängig vom Standort relativ konstant.

Horizontalwurzeln erstrecken sich weit über den Kronenradius hinaus. Die Senker entspringen den flach oder leicht schräg im Boden verlaufenden Horizontalwurzeln. Unter vorteilhaften Bedingungen ist auch die Fichte imstande, ein Wurzelsystem von 450 bis 600 cm maximaler Tiefe und 930 bis 1800 cm horizontaler Ausdehnung auszubilden (SCHMIDT-VOGT 1989, STONE und KALISZ 1991). Viel häufiger bewirken jedoch Bodenverdichtung, -vernässung und andere Bodeneigenschaften früh den Abort der Pfahlwurzel, so daß ein tellerförmiges Wurzelsystem entsteht oder übrigbleibt.

Wurzelhabitus der Buche

Ein halbkugeliges, intensiv verzweigtes Herzwurzelsystem, ohne eindeutige Trennung zwischen Vertikal- und Horizontalwurzeln, ist typisch für die Buche. Die Hauptwurzelmasse ist bei tiefgründigen Böden auf den Raum unter der Krone beschränkt. Das Wurzelwerk ist in der Regel im Vergleich zu dem der Fichte gering ausgedehnt, obwohl auch extreme Reichweiten zwischen 570 und 620 cm und maximale Tiefen zwischen 180 und 350 cm erreicht werden können (STONE und KALISZ 1991).

3 Sturm und Standfestigkeit

Unter Sturmbelastung treten viele Phänomene auf, die weit über die reine Statik hinausgehen. Zunächst ist ein Baum kein starrer Körper. Im Waldbestand bilden die Bäume Kollektive, in denen sie sich im Wind anders als alleinstehende Individuen verhalten. Die Beziehungen zwischen Bestandesausformung und Sturm sind vielfältig, und vieles ist bekannt. Dürftig sind hingegen die Kenntnisse der Verankerungskräfte, obwohl SCHMIDT-VOGT (1989) dazu einige Forschungsergebnisse zusammenfaßt.

3.1 Kräfteverteilung im Wurzelraum bei Windbelastung

Auf den Wurzelraum wirken (1) Gewicht des Baumes und (2) Luftströmungen (Abb. 3). Die Auswirkung starker Luftbewegungen auf den oberirdischen Teil des Baumes ist von verschiedenen Größen wie Windgeschwindigkeit, Böigkeit, Kronengröße, Exposition und Baumhöhe abhängig. Oberhalb von 20 bis 30 m Höhe steigt die Windgeschwindigkeit gegenüber Bodenniveau um 50 % (LÜPKE und SPELLMANN 1997).

Die resultierenden Kräfte verursachen ein erhebliches Biegemoment, das über den Stamm als Hebelarm und die Wurzeln in den Boden übertragen wird:

$$M_b = L \cdot F,$$

wobei

M_b = Biegemoment

L = Hebellänge

F = Kraft.

Der Hebelarm der Wurzeln ist meistens wesentlich kleiner als die des Stammes, so daß am Wurzelteller viel größere Kräfte wirken als am Stamm. Auf der Windseite (Luv) des Stammes entsteht Zugkraft, die den Wurzelteller anhebt. Auf der windabgewandten Seite (Lee) wirken dagegen Druckkräfte. Ob der Baum entwurzelt wird oder ob er diesen Kräften widersteht, ist u. a. davon abhängig, wie die Kräfte auf das Wurzelsystem übertragen werden und wie und wo Wurzelsystem und Erdreich sich im Bereich der Drehachse zu einem statischen Körper zusammenfügen. Das Gewicht des Wurzelballens wird gelegentlich als Widerpart der oberirdisch wirkenden Kräfte genannt. Es wird weitgehend vom Wurzelhabitus beeinflusst. In der Natur sind die Kräfteverhältnisse weit komplexer als bisher dargestellt. So muß neben dem Biegemoment auch das Torsionsmoment M_t , z. B. zufolge einseitiger Baumkrone oder Wirbel in der Windbewegung beachtet werden. Schließlich ist der Umstand von Bedeutung, daß im Sturm laminare Luftströmung kaum vorkommt. Viel-

mehr herrschen Böen, welche den Baum hin und zurück wippen lassen, wodurch unter Berücksichtigung von Windrichtungswechseln im Wurzel-Bodensystem Lockerungen rund um den Baum stattfinden (MAYER 1985). Nähert sich der Böenrythmus der Frequenz der Baumschwingung, so tritt Sturmwurf oder Bruch ein. Die Wahrscheinlichkeit für Synchronschwingungen steigt mit der Sturmdauer. Im Wurzelraum sind Heterogenitäten der Korngrößenzusammensetzung und Wurzelverteilung, Scherkräfte insbesondere entlang der Wurzelballenkalotte, aber auch zwischen Bodenpartikeln und Wurzeln und viele andere bodenphysikalische bzw. bodenmechanische Elemente zu berücksichtigen. Zur Beeinflussung der Scherkräfte durch Mikroorganismen, z. B. Mykorrhizapilze, hat GRAF (1998)

Abb. 3. Kräfteverteilungen an einem Baum während des Sturmes (stark vereinfacht, schematisch, nach NIELSEN 1995, verändert).

Fig. 3. Distribution of forces acting upon a tree during a storm (schematic simplification after NIELSEN 1995).

in Experimenten positive Wirkung nachgewiesen. Von Bedeutung für die Lockerung der Verankerung ist das Stampfen und Kneten des Bodens durch die Bewegungen des Wurzeltellers im Sturm. Denn dadurch findet eine Verdichtung des Unterbodens auch in Stürmen statt, die nicht unmittelbar zum Wurf führen.

3.2 Wurzelsysteme und Sturm

Das Pfahlwurzelsystem, typisch z. B. für Tanne oder Eiche (Abb. 1), ist hinsichtlich der Standfestigkeit vorteilhafter als andere Wurzeltypen. Die bei Windbelastung entstehende

Kraft wird über Stamm, Stumpf (Wurzelstock) und Pfahlwurzel als Verlängerung des Stammes in die Erde geleitet. Die Drehachse des Drehmoments befindet sich in der Verlängerung des Stammes in der Pfahlwurzel oder im Boden. Ähnlich verlaufen die Kräfte auch durch ein Senker-System, sofern sich die Senker unmittelbar unter dem Wurzelstock befinden, wie das bei der Fichte auf durchlässigen Böden wahrscheinlich oft der Fall ist. Ein flaches, horizontal ausgedehntes Wurzelsystem – z. B. Wurzelteller von Fichte auf flachgründigen Böden – leitet den Kraftfluß nicht der Stammachse folgend in die Erde hinein, sondern durch den Hebelarm des Wurzelstockes seitlich vom Stamm weg, in die ZRT-Zone. Dort sind die Horizontalwurzeln so verengt, daß sie als Hebelarm dieser Kraft geringen Widerstand leisten. Ebenfalls seitlich findet die Kraftverteilung beim Senker-Wurzelsystem mit kurzen, weit vom Stammzentrum entfernten Senkern statt. An windexponierten Lagen (besonders Kuppen und Hanglagen) entstehen auf der Windseite (Luv, Zugseite, vgl. Abb. 3) des Stammes, besonders bei flachen Wurzelsystemen sog. Brettwurzeln. „Sie befestigen den äußeren Wurzelbereich wie ein Zugseil, steifen die lateralen Wurzeln aus und leiten den Kraftfluß direkt in die äußeren Wurzelbereiche. Die volle Länge als Hebelarm wird so wirksam“ (MATTHECK 1992). Die Brettwurzeln weisen innerhalb der ZRT-Zone einen exzentrischen, ovalen, I- oder T-förmigen Querschnitt auf, da das Holz, infolge einseitiger Belastung – vorwiegend auf die Wurzeloberseite – nur noch nach oben zuwächst.

3.3 Windbrüche am Wurzelansatz

Während die axiale Spannung am Stamm gleichmäßig verteilt ist, befindet sich eine auf Zugkraft empfindliche Stelle am Übergang vom geraden Stammteil zum Wurzelbereich. An diesen Stellen sind Windbrüche häufig, weil hier besonders starke Zugkräfte quer zur Holzfaserrichtung auftreten. MATTHECK (1992) nennt dies „eine biomechanische Tragödie“.

4 Umweltbedingte Modifikationen des Wurzelwerkes

Das Wurzelwerk ist ein plastisches, flexibles, sogar dynamisches System, das durch ständige Anpassungen an witterungs-, boden- und konkurrenzbedingte Einflüsse geprägt ist. Die Kombination verschiedener Faktoren, die das Wurzelsystem modifizieren, ist enorm, so daß wir uns auf die wichtigsten Faktoren beschränken müssen.

4.1 Natürliche Standortsfaktoren

Als Standort wird hier im Sinne der Standortstheorie die Gesamtheit der in einem Bestand wirksamen Umweltfaktoren verstanden (WALTER 1962).

Die Wurzeln reagieren auf die Umweltbedingungen im Rahmen genetischer Veranlagung anpassungsfähig und plastisch, so daß sich die Standfestigkeit eines Baumes im Laufe der Ontogenese verändert. Wurzelsysteme dominanter Bäume sind weitgehend symmetrisch aufgebaut und weit größer als die unterdrückter Nachbarbäume. Doch dies ist eher ein Hinweis auf die bestandesbedingten Einflüsse. Zu standortsbedingten Faktoren oder Sammelfaktoren einige Beispiele:

4.1.1 Lage

An windexponierten Hängen ist die Baumstabilität größer als in ebener Lage, da sich die Bäume an den Wind durch Bildung von Brettwurzeln oder mechanisch günstiger Wurzel-symmetrie anpassen können (COUTTS 1983, STOKES und GUITARD 1997, vgl. Kap. 3).

4.1.2 Bodeneigenschaften

Die Bodenverhältnisse stehen nach SCHMIDT-VOGT (1989) an erster Stelle aller Einfluß-faktoren auf die Sturmgefährdung

- Auf grund- oder stauwasserbeeinflussten Böden (sowohl kontinuierlich, periodisch als auch episodisch) sind die Wurzelsysteme beinahe aller Baumarten (ausgenommen Eiche, Erle oder Tanne) sehr flach (KREUTZER 1961, KÖSTLER et al. 1968, POLOMSKI und KUHN 1998). Waldbestände solcher Standorte sind grundsätzlich sturmgefährdet.
- Auf feuchten, tiefgründigen Böden mit großem Anteil an Ton und Schluff und mit verdichteten Horizonten ist das Sproßwachstum im Verhältnis zum Wurzelwachstum unausgewogen. Die oberirdische Masse ist stärker ausgebildet als die Wurzelmasse (BÜSGEN und MÜNCH 1927, beobachtet an jungen Fichten in stark bewässerten Kulturen). Da der Wurzelballen im Verhältnis zur Krone relativ klein bleibt, ist der Baum windwurfgefährdet. In feuchtem Zustand werden Ton und Schluff zudem plastisch, was die Verankerung wegen der Verringerung der Scherkräfte zusätzlich schwächt.
- In organischen Böden sind die Wurzeln sehr flach, deformiert und besonders asymmetrisch verteilt. Der Querschnitt vieler Skelettwurzeln ist oval, T- oder I-förmig, was maximale Zugfestigkeit bei geringem Materialverbrauch garantiert (RIGG und HARRAR 1931, ANON 1964). Diese Querschnittformen von Skelettwurzeln kommen nicht selten innerhalb der ZRT-Zone, besonders im Lee vor (NICOLL und RAY 1996).
- In Skelett/Felsböden mit Spalten und Klüften sind die Wurzelsysteme asymmetrisch und deformiert, bilden weniger, dafür längere Hauptseitenwurzeln aus. Auch wo die Pfahlwurzel verschwindet, wird der Baum durch tief in die Spalten hinein wachsende Seitenwurzeln gut verankert. Die Wurzeln sind weniger durch Wurzelfäule befallen, was besonders für die Fichte von Bedeutung ist (KÖSTLER et al. 1968) und sich in den Kalkalpen bestätigt hat.
- Auf Schotter sind die Durchwurzelungsverhältnisse besonders ungünstig. KÖSTLER et al. (1968) machen dafür sowohl mechanische Widerstände als auch Verletzungsgefahren durch die Bewegung der Bäume im Wind verantwortlich. Reine Flußschotter sowie Schutthalden im Gebirge neigen jedoch zu oberflächlicher Bodenbildung (auf Kalkschotter z. B. Rendzinen oder Pararendzinen). Doch sind auch andere Zweischichtböden in Bezug auf Windwurf Ursache erhöhter Risiken.

4.1.3 Licht, Wärmegenuß

Die Wirkung von Licht darf in den Jugendphasen nicht unterschätzt werden, die für die Ausformung des Wurzelsystems verantwortlich sind. Von Ausnahmen abgesehen nimmt bei Jungpflanzen der meisten Baumarten mit zunehmender Beschattung der Wurzelanteil im Vergleich zum Sproß ab. Unter Schattenwirkung findet zudem die Ausbildung flacher Wurzelsysteme statt. KÖSTLER et al. (1968) haben die wesentliche Literatur dazu ausgewertet.

Ähnliches wie vom Licht kann, mit gleicher Literaturgrundlage, auch vom Wärmegenuß gesagt werden: Auf kalten Standorten werden flache Wurzelsysteme gebildet.

4.2 Anthropogene Einflüsse

4.2.1 Bodenverdichtung

Mechanische Belastung mit schweren Traktoren, Beweidung oder Tourismus kann empfindliche Waldböden dauerhaft verdichten. SCHACK-KIRCHNER (1994) wies z. B. Bodenverdichtung mittels des Gasdiffusionskoeffizienten (eines Parameters, der sowohl Volumenveränderungen als auch Transportleitfähigkeit berücksichtigt) bis 10 Jahre nach der praxisüblichen Befahrung eines lehmigen Waldbodens nach.

Besonders zu beachten ist die Verdichtung des Unterbodens, der weniger regenerationsfähig ist als die biologisch aktivere oberste Bodenschicht. Klimatische Bedingungen und Bodenbeschaffenheit beeinflussen Ausmaß und Dauer der Veränderungen, z. B. ist die Regenerationsfähigkeit der Schluffböden oder der nassen Böden geringer (EHLERS et al. 2000, HORN et al. 2000).

Waldweide ist in der heutigen Zeit kein Einflussfaktor der Bodenverdichtung mehr. Die Bäume, die heute von Stürmen geworfen werden, sind indessen zu einer Zeit aufgewach-

sen, als Beweidung des Waldes, insbesondere in den Voralpen und Alpen, noch üblich war. Vergleichende Untersuchungen zu diesem Thema sind bisher nicht bekannt.

4.2.2 Bodenversauerung

Bodenversauerung ist eine zwangsläufige Folge der natürlichen Bodenbildung. Wieweit sie kurzfristig die Entwicklung des Wurzelsystems beeinflussen kann, ist sowohl durch Vergleiche der Wurzelsysteme verschiedener Standorte (z. B. PUHE 1994) als auch durch Experimente (z. B. RASPE et al. 1998) gezeigt worden. Fast unermesslich ist die Zahl der Experimente, in denen Wuchs- und Wachstumsmechanismen von Wurzeln in Nährlösungen untersucht wurden. Die Resultate sind so unterschiedlich wie die methodischen Ansätze. Die Widersprüche dokumentieren die Komplexität der Prozesse und der (primären) Standortsfaktoren sowie ihrer Wechselwirkungen.

Die Bodenreaktion setzt sich sowohl aus der H-Ionenbelegung des Austauschers (Ton-Mineralien, Allophane, Humus u. a.) als auch der H-Ionenkonzentration (die u. a. im pH-Wert zum Ausdruck kommt) der Bodenlösung zusammen. Beiden ist die Wurzel wechselweise ausgesetzt.

Die H⁺-Ionen sind im pH-Bereich zwischen 4 und 8 für die Wurzeln nicht unmittelbar schädlich. Dennoch nimmt die Absorptionsrate von Kationen bei pH-Werten unter 5 ab. Gleichzeitig steigt die Löslichkeit des Aluminiums, dessen ionische Formen (Al⁺⁺⁺ und -AlOH²⁺) für Wurzeln vieler Pflanzenarten schädlich sein können (CARSON 1974).

Die toxische Wirkung von Aluminium auf unverholzte Wurzeln wurde in zahlreichen Hydrokultur-Experimenten nachgewiesen. Doch in Gegenwart organischer Substanzen (Humus) herrschen ganz andere Löslichkeitsgleichgewichte als in anorganischen Lösungen. Man darf deshalb „nicht ohne weiteres aus dem Verhalten der Pflanzen in Wasserkulturen auf ihr Verhalten im Boden schließen“ (ELLENBERG 1958). Dies muß wohl auch bei der Würdigung der Experimente von NEITZKE und RUNGE (1986) in Betracht gezogen werden, die den Einfluß der Form der Stickstoffernährung auf die Al-Toxizität auf Wurzeln von Buchenkeimlingen in Nährlösungen untersuchten.

Sowohl die Wirkungsweise des Aluminiums auf die Wurzeln als auch die Toleranzmechanismen sind mannigfaltig und beim weitem nicht restlos abgeklärt. Beispielsweise verfügen die Wurzeln mindestens der Waldbäume mit den sog. Casparischen Streifen über einen Pförtnermechanismus, welcher unerwünschte Substanzen, insbesondere mehr als zweiwertige Ionen, am Eindringen hindert. Aluminium wird deshalb i. d. R. nur im Cortex, der Wurzelrinde von Buchen, nachgewiesen (SANDER 1996). Hier wirkt sich das antagonistische Verhalten von H- und Al-Ionen aus: Bei tiefen pH-Werten werden Rhizosphäre und Zellwandoberflächen von den in der Lösung dominierenden H-Ionen besetzt und Al-Ionen verdrängt.

Außerdem kommt SANDER (1996) zum Schluß, daß die Element-Konzentrationen in der Wurzelrinde nicht ausschließlich von der Konzentration in der Bodenlösung bestimmt werden. Andere Faktoren wie Wasserfluß, Wurzelaktivität sowie Beeinflussung der Rhizosphäre seitens der Wurzel oder aber die Mykorrhiza spielen eine bedeutende Rolle. Erhöhte Al-Konzentrationen in der Bodenlösung nach Ammonsulfatdüngung im Schwarzwald verursachte weder Schädigung der Feinwurzeln noch Rückgang der Durchwurzelungsdensität (RASPE et al. 1998). Überhaupt bezweifeln die Autoren einen direkten Zusammenhang zwischen niedrigen Ca/Al-Verhältnissen im Boden und Wurzelschädigung. Vielmehr postulieren sie eine antagonistische Hemmung der Mg-Ca-Aufnahme zufolge erhöhter Al-Konzentrationen in der Bodenlösung. Zudem machen sie auf den wirkungsvollen Mechanismus der Al-Enttoxifizierung bei Koniferen nach MARSCHNER (1989) aufmerksam. Auch GRUBER (1992) fand bei 19jährigen Fichten in nicht immissionsbelasteten Beständen der Julischen Alpen (Kalk!), trotz sehr hohen Al-Gehalten in den Feinwurzeln, keine Schadsymptome, weder an den Feinwurzeln noch an der Baumkrone.

Nicht selten wurden widersprüchliche Ergebnisse erzielt. Manche aluminiumtolerante Arten weisen z. B. ausgesprochen hohe Al-Gehalte im Gewebe auf, während andere, eben-

so aluminiumresistente Pflanzenarten, sehr geringe Al-Mengen kumulieren (CARSON 1974). Die Interpretation der Wurzelentwicklung „bei Einbezug eines einzelnen extremen Faktors wie z. B. der Bodenversauerung“ beurteilt DREXHAGE (1994) als problematisch.

Einige Beobachtungen, insbesondere an Fichten, weisen daraufhin, daß für die Bewurzelungsstrategie nicht ausschließlich der pH-Wert, sondern auch andere, bis heute noch nicht klar definierte Substrateigenschaften maßgebend sind.

So beobachtete PUHE (1994), daß die Wurzeln 40jähriger Fichten stark saure mineralische Bodenhorizonte meiden und die Hauptwurzelmasse in der ebenso sauren Humusauflage unter der Oberfläche ausbreiten. Dies ist nach KRAUSS et al. (1934) für Fichtenwurzeln nicht außergewöhnlich. In jenen Fichtenreinbeständen auf podsoligen Granitverwitterungsböden des Erzgebirges beschränkten sich die Feinwurzeln beinahe ausschließlich auf den sehr sauren Auflagehumus, mieden aber die darunterliegende weniger saure Mineralerde. Das Phänomen wird mit dem fehlenden chemotaktischen Anreiz des (ausgebleichten) obersten Mineralhorizonts erklärt. Dieses Verhalten wurde von vielen anderen Autoren bestätigt (vgl. POLOMSKI und KUHN 1998). Anders die Durchwurzelung in Mischbeständen: Unter vergleichbaren Bedingungen wurzeln Fichten in Mischbeständen mit Buche, Ahorn und Tanne weit tiefergründiger (KRAUSS et al. 1934). Die Fichtenwurzeln benutzen hier die Kanäle abgestorbener Wurzeln der anderen Baumarten, in denen sie kaum mechanische Widerstand, dafür aber ausreichend organische Substanz vorfinden.

Auch auf Felsböden der Kalkalpen mit breiten Spalten und Rissen (Karrenfeldern) sind die Wurzeln der dort verbreiteten Fichtenbestände gesund.

Sorgfältiger Abklärung bedürfen die Zusammenhänge zwischen der Wurzelfäule verschiedener Ursprungs (*Armillaria* sp., *Heterobasidion annosum*, *Phytophthora*) und den Bodeneigenschaften, insbesondere bei Aufforstungen auf ehemaligen landwirtschaftlichen Böden, deren chemische und mechanische Eigenschaften infolge Bodenbearbeitung und Düngung stark verändert wurden.

Kalkhaltige Böden mit hohem Sandanteil begünstigen die Rotfäule-Infektion (*Heterobasidion annosum*), da unter solchen Bedingungen antagonistische Pilze fehlen (KORHONEN und STENLID 1998). Für die Epidemiologie dieser Krankheit scheinen, außer der Baumart, vor allem Nutzungsgeschichte und Bewirtschaftungsmethoden des Bestandes eine wesentliche Bedeutung zu haben (WOODWARD et al. 1998).

4.2.3 Luftverschmutzung

Als Substanzen belasteter Atmosphäre gelten in bezug auf Pflanzen sowohl Schad- wie Nährstoffe. Beide Kategorien wurden im Rahmen der Waldschaden-Kontroverse eingehend debattiert und erforscht. Die Ergebnisse bezüglich der Auswirkungen von Stickstoffdepositionen oder erhöhter Kohlendioxid-Konzentrationen auf das Wurzel-Sproßverhältnis sind ebenso kontrovers ausgefallen wie jene der Versauerungsthese (CLEMENSSEN-LINDELL und PERSSON 1995, ZOGG et al. 1996, WIEMKEN et al. 1997, NELSON und NORBY 1999).

An Fichtenbeständen mit Nadelverfärbungen im Schwarzwald (RASPE et al. 1998) wurden wegen Mangelverdachts Düngungsexperimente durchgeführt, und zwar mit Magnesium (verschiedene Formen), aber auch Ammoniumsulfat. Ähnlich wie bei PUHE (1994) und KRAUSS et al. (1934) befindet sich die Haupt-Feinwurzelmasse trotz charakteristischem Senkerwurzelssystem in der organischen Auflage. Nur in einem einzigen Bestand wurde durch Kieseritdüngung ($MgSO_4$) eine geringe Zunahme und Tiefenverlagerung der Feinwurzelintensität erwirkt. Andere Mineralsalzgaben blieben in bezug auf die Feinwurzelverteilung ohne Folgen. Durch Ammoniumsulfat wurde aber die relative Mykorrhizahäufigkeit kurzfristig vermindert. Da Magnesium nicht zu den Elementen zählt, welche verbreitet und großflächig die Luft belasten, soll hier nicht weiter darauf eingegangen werden. Was hingegen die Stickstoffdeposition betrifft, kommen RASPE et al. (1998) zum Schluß, „eindeutige Reaktionen des Feinwurzelsystems seien nicht festzustellen“. Vielmehr haben „standörtliche Faktoren, v. a. die Nutzungsgeschichte, eine wesentlich größe-

re Bedeutung ... als der aktuelle N-Eintrag. Eine zunehmende N-Sättigung der untersuchten Waldökosysteme konnte nicht beobachtet werden“.

Andere Untersuchungen an Feinwurzeln verschiedener Waldbäume ergaben, daß vor allem Stickstoff-Düngung, aber auch die erhöhte CO₂-Konzentrationen in der Atmosphäre Produktion und Lebensdauer der Feinwurzeln von *Picea abies* (MAJDI und NYLUND 1996), *Pinus radiata* (THOMAS et al. 1999) herabsetzen. Auch das Gegenteil wurde beobachtet, nämlich eine Zunahme der Lebensdauer der Feinwurzeln von *Pinus ponderosa* bei erhöhten CO₂-Konzentrationen (TINGEY et al. 1997). Andere Autoren (BERNTSON und BAZZAZ 1996) konnten bei *Acer rubrum* oder *Betula papyrifera* keinen Einfluß ausmachen.

Die meisten Versuche waren kurzfristig angelegt, so daß die häufig bedeutenden jahreszeitlichen Schwankungen der Feinwurzeldynamik (JOHNSON et al. 2000) nicht berücksichtigt wurden.

Anders als PUHE (1994), der Wurzelsysteme von Fichtenbeständen verschiedener Standorte untersuchte, haben MAUER und PALATOVA (1988) im Erzgebirge Wurzelsysteme einiger auf vergleichbaren Böden wachsender 10 bis 20-jähriger Fichtenbestände studiert. Die Bestände waren unterschiedlicher SO₂-Belastung ausgesetzt und zeigten entsprechend unterschiedliche Kronenschäden. Die SO₂-Emissionen beeinträchtigten das Skelettwerk nicht, verminderten aber den Feinwurzelapparat, insbesondere im Oberboden. Dagegen scheint eine bessere Durchwurzelung tieferer Bodenhorizonte erfolgt zu sein.

4.2.4 Waldpflege

Das Hauptinteresse der vorliegenden Abhandlung gilt den speziellen Problemen der Verankerung der Bäume und den Beziehungen zum Wurzelhabitus. Deshalb wird hier die Bedeutung der Bestandesausformung lediglich angedeutet. Baumartenwahl, Jungwuchs- und Dickungspflege, Durchforstung, Pflanzverfahren, Schlag- und Betriebsformen üben alle enorme Einflüsse auf die Windwurfanfälligkeit der Bestände aus (KÖSTLER et al., 1968). Soweit sie das Wurzelsystem betreffen, sind sie hier erwähnt. Was darüber hinaus geht, wurde von SCHMIDT-VOGT (1991) hervorragend zusammengefaßt.

4.2.5 Holzernte

Zweifellos beeinflusst die Holzernte die Verankerung der Bäume. So haben BUTORA und SCHWAGER (1986) 28,8 % aller Rücke- und Fällschäden im Wurzelbereich lokalisiert. BAZZIGHER und SCHMID (1969) sowie SCHMID und BACHOFEN (1991) sind den Stamm- und Wurzelfäulen an aufgeworfenen Wurzeltellern nachgegangen. Neben Rückeschäden verwiesen sie auf die Möglichkeit der Bodenverdichtung durch schwere Traktoren als Ursache (vgl. Kap. 4.2.1). Gerade auf Böden, die zu Verdichtung neigen oder von Natur aus verdichtet sind (z. B. Grundmoränen), führt jedoch das in Windböen stattfindende Stampfen und Kneten der Bäume zum gleichen Resultat (Kap. 3.1).

5 Folgerungen

Die Standfestigkeit der Bäume ist Ergebnis eines komplexen Beziehungsgefüges zwischen Wurzel- und Sproßwachstum sowie der Gesamtheit der Umweltfaktoren.

Die verbreitete Meinung, wonach die Wurzelwerke infolge Luftverschmutzung und Bodenversauerung kleiner und dadurch die Bäume weniger standfest geworden seien, bleibt aufgrund der untersuchten Sachverhalte Behauptung. Der Nachweis ist bislang nicht erbracht. Dazu wären zuerst Voraussetzungen der Vergleichbarkeit zu schaffen. Insbesondere sind folgende Zusammenhänge zu beachten:

- (1) Zur Feststellung von Größenveränderungen an Wurzeltellern oder Wurzelballen müssen einerseits die entsprechenden Ausmasse umfangreicher Baumkollektive früherer Zustände bekannt sein, andererseits heute in Standort, Baumartenzusammensetzung und Struktur vergleichbare Bestände gefunden werden. Da solche Voraussetzungen nicht hinreichend gegeben sind, kann ein Vergleich kaum schlüssig angestellt werden.

Beispiele früherer Wurzelsystemausgrabungen lassen eher darauf schließen, dass sich unter vergleichbaren Standorts- und Bestandesbedingungen keine Veränderungen nachweisen lassen.

- (2) Die Standfestigkeit eines Baumes ergibt sich einerseits aus den über Krone und Stamm auf den Wurzelkörper wirkenden Kräfte sowie andererseits die dagegen anwirkende Verankerung der Wurzeln im Boden. Zwischen Kräfteverteilung im Wurzelkörper und Architektur (Habitus) des Wurzelsystems besteht ein enger Zusammenhang.
- (3) Die Architektur des Wurzelsystems ist in erster Linie durch die Baumart gegeben. Vergleiche sind nur innerhalb der gleichen Baumart statthaft. Innerhalb der gleichen Baumart ergeben sich mehr oder minder ausgeprägte Modifikationen der Wurzelarchitektur durch Bodeneigenschaften und andere natürliche Umweltbedingungen.
- (4) Die Standfestigkeit nimmt mit der Baumhöhe und als Folge davon mit dem Baumalter ab. Habitus und Gesundheitszustand der Wurzeln sowie Wurzel/Sproß-Verhältnis gewährleisten in den ersten Jahrzehnten optimale Standfestigkeit. Diese verschlechtert sich jedoch mit zunehmendem Baumalter von Natur aus.
- (5) Die bei Windwurf oder in Zugversuchen ausgerissenen Wurzelballen stellen nur einen Teil des Gesamtwurzelsystems dar. Die Bedingungen des Abrisses einzelner Wurzeln sind lediglich bei Fäulen offensichtlich. Für Abriß kommen auch vorgängige Stauchung durch Druck und viele andere Einflüsse als Ursache in Frage.
- (6) Anthropogen bedingte Bodenversauerung oder Luftverschmutzung vermögen das Wurzelwachstum durchaus zu beeinflussen. Ihr Einfluß erstreckt sich jedoch kaum auf die für die Standfestigkeit der Bäume in erster Linie verantwortlichen Skelettwurzeln. Die Skelettwurzelsysteme heute wurfbereiter Bäume wurde in früheren Zeiten angelegt. Die rezenten Einflüsse stehen dazu nicht zur Diskussion. Bodenversauerung ihrerseits ist nicht ausschließlich rezenter atmosphärischer Herkunft, sondern ein mit der Bodenbildung einhergehender Naturvorgang.
- (7) Stamm- und Wurzelfäulen vermindern zweifellos die Standfestigkeit älterer Bäume. Für eine immissionsbedingte Zunahme der Wurzelfäule fehlt der Nachweis. Unbestritten sind jedoch die Ergebnisse, welche Wurzelfäulen auf unzuverlässige Baumartenwahl, Monokulturen, Stockinfektion, unsorgfältige Holzernte, aber auch naturgegebene Voraussetzungen des Standorts zurückführen.
- (8) Die Auswirkung der für die Bodenversauerung massgeblichen H- und Al-Ionen auf die Skelettwurzeln wurden unseres Wissens nicht untersucht. Viele Studien betreffend die Aluminiumtoxizität wurden an unverholzten Feinwurzeln von Keimlingen oder Sämlingen, oft in Hydrokulturen durchgeführt, deren Ergebnisse sich auf Waldbestände nur teilweise und nicht direkt übertragen lassen.
- (9) Im Feinwurzelbereich findet ein beträchtlicher jährlicher Umsatz statt. Viele Feinwurzeln sterben ab, während andere neu gebildet werden. Darauf beruht die Anpassungsfähigkeit des Feinwurzelsystems der Bäume an periodische, episodische und spontane Umweltveränderungen.

6 Literatur

- ALDINGER, E., SEEMANN, D., KONNERT, V., 1996: Wurzeluntersuchungen auf Sturmwurfflächen 1990 in Baden-Württemberg. Mitt. Ver. forstl. Standortskd. Forstpflanzenzücht 38: 11–24.
- ANON, 1964: Liability of trees on peat to winthrow. Scott. For. 18: 38–43.
- BAZZIGHER, G., SCHMID, P., 1969: Sturm Schäden und Fäule. Schweiz. Z. Forstwes. 120: 521–534.
- BERNTSON, G. M., BAZZAZ, F. A., 1996: The allometry of root production and loss in seedling of *Acer rubrum* (Aceraceae) and *Betula papyrifera* (Betulaceae): implications for root dynamics in elevated CO₂. Am. J. Bot. 83: 608–616.
- BURGER, H., 1924: Waldbodenphysik und Stockrodung. Z. Forst-Jagdwes. 56: 451–462.
- BUSGEN, M., MÜNCH, E., 1927: Bau und Leben unserer Waldbäume. Verlag Gustav Fischer, Jena 426 S.
- BUTORA, A., SCHWAGER, G., 1986: Holzernteschäden in Durchforstungsbeständen. Ber. Eidg. Anst. Forstl. Vers. wes. 288, 51 S.

- CARSON, E. W., 1974: The plant root and its environment. Proceedings Virginia Polytechnic Institute and State Univ. 1971, University Press Virginia, Charlottesville 691 S.
- CLEMENSSON-LINDELL, A., PERSSON, H., 1995: Fine-root vitality in a Norway spruce stand subjected to various nutrient supplies. *Plant Soil* 168–169: 167–172.
- COUTTS, M. P., 1983: Root architecture and tree stability. *Plant Soil* 71: 171–188.
- DREXHAGE, M., 1994: Die Wurzelentwicklung 40jähriger Fichten (*Picea abies* (L.) Karst.) in der Langen Bramke. Ber. Forschungszentr. Waldökosyst. Göttingen, Reihe A, Bd. 111, 165 S.
- DREXHAGE, M., GRUBER, F., 1998: Architecture of skeletal root system of 40-year-old *Picea abies* on strongly acidified soils in the Harz mountains (Germany). *Can. J. For. Res.* 28: 13–22.
- EHLERS, W., WERNER, D., MÄHNER, TH., 2000: Wirkung mechanischer Belastung auf Gefüge und Ertragsleistung einer Löß-Parabraunerde mit zwei Bearbeitungssystemen. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 63: 321–333.
- EICHHORN, J., 1991: Wurzeluntersuchungen an sturmgeworfenen Bäumen der Frühjahrsorkane 1990 in Hessen. Forschungsberichte Hess. FVA 12: 92–155.
- EIS, S., 1974: Root system morphology of western hemlock, western red cedar, and Douglas-fir. *Can. J. For. Res.* 4: 28–38.
- ELLENBERG, H., 1958: Bodenreaktion (einschließlich Kalkfrage). *Handbuch Pflanzenphysiol.* 4: 638–708.
- GRAF, F., 1998: Anforderungen an den Boden bei Renaturierungen oberhalb der Waldgrenze. *Ingenieurbiologie* 8 (4): 12–18.
- GRUBER, F., 1992: Dynamik und Regeneration der Gehölze. *Berichte d. Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe A, Bd. 86*, 420 S.
- GRUBER, F., 1994: Morphology of coniferous trees: possible effects of soil acidification on the morphology of Norway spruce and silver fir. In: *Effects of acid rain on forest processes*. HÜTTERMANN, A. (ed.), John Wiley & Sons, Inc., N.Y. p. 265–324.
- HELLIWELL, D. R., 1989: Tree roots and the stability of trees. *Arboric. J.* 13: 243–248.
- HORN, R., VAN DEN AKKER, J. J. H., ARVIDSSON, J., 2000: Subsoil compaction. Distribution, Processes and Consequences, *Advances in Geoecology* 32, Catena Verlag, Reiskirchen 462 S.
- JOHNSON, M. G., PHILLIPS, D. T., STORM, M. J., 2000: Effects of elevated CO₂, N-fertilization, and season on survival of ponderosa pine fine roots. *Can. J. For. Res.* 30: 220–228.
- KLEIN, E., 1995: Ist Sturm die wichtigste Ursache der Kernfäule bei Fichte? *AFZ.* 15: 819–821.
- KORHONEN, K., STENLID, J., 1998: Biology of *Heterobasidion annosum*. In: *WOODWARD S., STENLID J., KARJALAINEN R., HÜTTERMANN, A. (eds), Heterobasidion annosum. Biology, Ecology, Impact and Control*. CAB International, Oxon UK. 43–70.
- KÖSTLER, J. N., BRÜCKNER, E., BIBELRIETHER, H., 1968: *Die Wurzeln der Waldbäume*. Hamburg, Berlin: Verlag Paul Parey 284 S.
- KRAUSS, G., WOBST, W., GÄRTNER, G., 1934: Humusaufbau und Bodendurchwurzelung im Eibenstocker Granitgebiet. *Tharandter Forstl. Jahrb.* 85: 290–370.
- KREUTZER, K., 1961: Wurzelbildung junger Waldbäume auf Pseudogleyböden. *Forstwiss. Cent.bl.* 80: 356–392.
- KUTSCHERA, LORE; SOBOTIK, MONIKA; LICHTEREGGER, E.; HAAS, D., 1997: Bewurzelung von Pflanzen in verschiedenen Lebensräumen. *Wurzelatlasreihe Bd. 5, Stapfia* 49, 331 S.
- LUPKE, V. B., SPELLMANN, H., 1997: Aspekte der Stabilität und des Wachstums von Mischbeständen aus Fichte und Buche als Grundlage für waldbauliche Entscheidungen. *Forstarchiv* 68: 167–179.
- MAJDI, H., NYLUND, J.-H., 1996: Does liquid fertilization affect fine root dynamics and lifespan of mycorrhizal short roots? *Plant Soil* 185: 305–309.
- MARSCHNER, H., 1989: Effects of soil acidification on root growth, nutrient, and water uptake. Hrsg.: ULRICH, B., *Internationaler Kongress Waldschadensforschung: Wissensstand und Perspektiven. Forschungsbeirat/Luftverunreinigung der Bundesregierung und der Länder. Friedrichshafen, BRD, 1989 Vorträge Bd. I*, 381–404.
- MATTHECK, C., 1992: Die Baumgestalt als Autobiographie. Einführung in die Mechanik der Bäume und ihre Körpersprache. Hrsg.: Kernforschungszentrum, Karlsruhe 137 S.
- MAUER, O., PALATOVA, EVA, 1988: Effects of acid air pollutants on the root system development in Norway Spruce (*Picea abies* L. Karst.). *Acta Univ. Agric. (Brno) Ser. C. (Fac. silvicult.)* 1–4: 105–120.
- MAYER, H., 1985: Baumschwingungen und Sturmgefährdung des Waldes. *Münchener Universitäts-Schriften, Univ. München – Meteorologisches Institut, Wiss. Mitt.* 51, 247 S.
- NETZKE, MECHTILD, RUNGE, M., 1986: Aluminiumschädigung von Jungpflanzen der Buche (*Fagus sylvatica* L.) in Abhängigkeit von der Form des N-Angebots., Hohenheim, *Verh. Gesellsch. f. Ökologie* 14: 343–350.
- NELSON, T. E., NORBY, R. J., 1999: Below-ground respiratory responses of sugar maple and red maple saplings to atmospheric CO₂ enrichment and elevated air temperature. *Plant Soil* 206: 85–97.
- NICOLL, B. C., EASTON, E. P., MILNER, A. D., WALKER, C., COUTTS, M. P., 1995: Wind stability factors in tree selection: distribution of biomass within root systems of Sitka spruce clones. In: COUTTS, M. P., GRACE, J. (eds.), *Wind and Trees*. Cambridge Univ. Press, Cambridge 276–292.

- NICOLL, B. C., RAY, D., 1996: Adaptive growth of tree root systems in response to wind action and site conditions. *Tree Physiol.* 16: 891–898.
- NIELSEN, C. C. N., 1995: Recommendations for stabilisation of Norway spruce stands based on ecological surveys. In: COUTTS, M. P., GRACE, J. (eds.) *Wind and Trees*. Cambridge Univ. Press, Cambridge 424–435.
- POLOMSKI, JANINA; KUHN, N., 1998: Wurzelsysteme. WSL/FNP, Haupt-Verlag, Bern 290 S.
- PUHE, J., 1994: Die Wurzelentwicklung der Fichte (*Picea abies* [L.] Karst.) bei unterschiedlichen chemischen Bodenbedingungen. Göttingen: Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe A, Bd. 108, 128 S.
- RASPE, S., FEGER, K. H., ZÖTTL, H. W., 1998: Ökosystemforschung im Schwarzwald. Landsberg: eco-med, Umweltforschung in Baden-Württemberg 533 S.
- RIEDER, A., 1997: Weit- oder Dichtstand – was verringert Sturmschäden? *Österr. Forstztg.* 7: 25–28.
- RIGG, G. B., HARRAR, E. S., 1931: The root systems of trees growing in Sphagnum. *Am. J. Bot.* 18: 391–397.
- ROLOFF, A., RÖMER, H. P., 1989: Beziehung zwischen Krone und Wurzeln bei der Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.). *Allg. Forst- Jagdztg.* 160: 200–205.
- SANDER, KATHRIN, 1996: Röntgenanalytische Untersuchungen zur Aluminium-Toxizität an Buchenfeinwurzeln aus Altbeständen. Göttingen: Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe A, Bd. 141, 107 S.
- SCHACK-KIRCHNER, H., 1994: Struktur und Gashaushalt von Waldböden. Göttingen: Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe A, Bd. 112, 241 S.
- SCHMID-HAAS, P., BACHOFEN, H., 1991: Die Sturmgefährdung von Einzelbäumen und Beständen. *Schweiz. Z. Forstwes.* 142: 477–504.
- SCHMIDT-VOGT, H., 1977, 1989, 1991: Die Fichte. Bd. I (647 S.), Bd. II/2 (607 S.), Bd. II/3 (781 S.) Hamburg/Berlin Parey.
- SCHMIDT-VOGT, H., WÜTHERICH, G., DEICHNER, P., 1987: Untersuchungen zur Sturmstabilität von Fichten und Tannen in Fichten-Tannen-Mischbeständen auf verschiedenen Standorten Süddeutschlands. *Allg. Forst-Jagdztg.* 158: 42–50.
- STOKES, A., GUITARD, D., 1997: Tree root response to mechanical stress. In: ALTMAN, WASEL, Y. (eds): *The biology of root formation and development*, Plenum Publishing Corp. N. Y. *Basic Life Sci.* 65: 227–236.
- STONE, E. L., KALISZ, P. J., 1991: On the maximum extent of tree roots. *For. Ecol. Manag.* 46: 59–102.
- Strong, W. L., La Roi, G. H., 1983: Root-system morphology of common boreal forest trees in Alberta, Canada. *Can. J. For. Res.* 13: 1164–1173.
- THOMAS, S. M., WHITEHEAD, D., REID, J. B., COOK, F. J., ADAMS, J. A., LECKIE, A. C., 1999: Growth, loss, and vertical distribution of *Pinus radiata* fine roots growing at ambient and elevated CO₂ concentration. *Global Change Biol.* 5: 109–124.
- TINGEY, D. T., PHILLIPS, D. L., JOHNSON, M. G., STORM, M. J., BALL, J. T., 1997: Effects of elevated CO₂ and N-fertilization on fine root dynamics and fungal growth in seedling of *Pinus ponderosa*. *Environ. Exp. Bot.* 37: 73–83.
- ULRICH, B., 1986: Die Rolle der Bodenversauerung beim Waldsterben: Langfristige Konsequenzen und forstliche Möglichkeiten. *Forstwiss. Cbl.* 105: 421–435.
- ULRICH, B., PIROUZPANACH, D., MURACH, D., 1984: Beziehungen zwischen Bodenversauerung und Wurzelentwicklung von Fichten mit unterschiedlich starken Schadsymptomen. *Forstarchiv* 55: 127–134.
- WALTER, H., 1962: Einführung in die Phytologie Bd. III, Teil 1: Standortslehre. 2. Aufl. Stuttgart, Eugen Ulmer, 525 S.
- WIEMKEN, VERENA, INEICHEN, K., WIEMKEN, A., 1997: Auswirkungen von Umweltveränderungen auf die Wurzeln, die Rhizosphäre und den Boden. Schlussbericht NFP 31, Vdf Hochschulverlag AG., ETH Zürich 84 S.
- WOODWARD S., STENLID J., KARJALAINEN R., HÜTTERMANN A., 1998: *Heterobasidion annosum*. Biology, Ecology, Impact and Control. CAB International, Oxon UK. 589 S.
- ZOGG, G. P., ZAK, D. R., BURTON, A. J., PREGITZER, K. S., 1996: Fine root respiration in northern hardwood forests in relation to temperature and nitrogen availability. *Tree Physiology* 16: 719–725.
- ZOTH, R., BLOCK, J., 1992: Untersuchungen an Wurzelballen sturmgeworfener Bäume in Rheinland-Pfalz. *Forst und Holz* 47: 566–571.

Anschriften der Verfasser: JANINA POLOMSKI, Dr. NINO KUHN, Eidgenössische Forschungsanstalt, WSL, Zürcherstr. 11, CH-8903 Birmensdorf