

Die mechanische Stabilität von Bäumen: das Projekt Baumstabilität des FB Naturgefahren

Andrea Foetzki, Martin Jonsson, Matthias Kalberer, Holger Simon, Andrea C. Mayer, Tor Lundström, Veronika Stöckli, Walter J. Ammann

Eidg. Institut für Schnee und Lawinenforschung SLF, Flüelastrasse 11, CH-7260 Davos Dorf

foetzki@slf.ch, jonsson@slf.ch, kalberer@slf.ch, simon@slf.ch, mayer@slf.ch, t.lundstroem@slf.ch, v.stoekli@slf.ch, ammann@slf.ch

Um die Stabilität von Bäumen gegen Naturgefahren beurteilen zu können, sind noch offene Fragen zur Interaktion von Bäumen mit einwirkenden Kräften zu klären. Vor allem zur Verankerung durch das Wurzelsystem von Bäumen in Gebirgswäldern und in Hanglage ist bisher wenig bekannt. Mit Tests zur Steifigkeit, Festigkeit und Schwingungsverhalten von Fichten sowie Untersuchungen zur ober- und unterirdischen Baumarchitektur und den Standortsverhältnissen sollen diese Wissenslücken geschlossen werden. Ziel des Projektes Baumstabilität ist, die gewonnenen Erkenntnisse über Modelle und Anwendungen auf andere Bestände übertragen zu können und nach einer Kosten-Nutzen-Analyse zur Schutzwirkbarkeit der Gebirgswälder gegen Naturgefahren Empfehlungen zu einer effizienten Schutzwaldpflege zu geben.

1 Einleitung

1.1 Schutzwald

Die Bedeutung des Waldes als Schutz vor Naturgefahren ist vielfältig. Der Wald zeigt gegen Lawinen und Rutschungen eine eher indirekte Schutzwirkung: der Aufbau einer gleichmässigen Schichtung der Schneedecke wird verhindert und die Rauigkeit erhöht, so dass die Wahrscheinlichkeit des Anreissens von Lawinen verringert wird (MARGRETH 2004 in diesem Band). Durch die Wurzeln wird die Scherfestigkeit und damit die Hangstabilität erhöht und der Bodenwasserhaushalt beeinflusst, so dass Erosion und Rutschungen vermindert werden (RICKLI *et al.* 2004 in diesem Band). Die Schutzwirkung gegen Steinschlag dagegen ist direkt: je höher die Stammzahl pro Fläche und je grösser die Stammdurchmesser, desto besser kann ein Stein gebremst bzw. aufgehalten werden. In bestehende Steinschlagmodelle gehen daher der Baumdurchmesser und die Bestandesdichte ein (KRUMMENACHER und KEUSEN 1997). Eine genauere Analyse der Interaktion zwischen Baum und Stein fehlt aber bisher. Auch im Zusammenhang mit der Stabilität von Wäldern gegen Wind sind noch viele Fragen offen.

Damit Konzepte entstehen können, wie die Baum- und Bestandesstabilität gegen verschiedene Naturgefahren beeinflusst werden kann, beantwortet das Projekt Baumstabilität am SLF folgende Fragen:

- Wie viel Energie kann ein Baum bei einem Steinschlagprall aufnehmen und wie verteilt sich diese Energie im Baum?
- Welchen Einfluss hat die Wurzelarchitektur auf die Verankerung im Boden?
- Wie wirken sich Pflegemassnahmen auf die Einzelbaumstabilität aus?
- Wie lässt sich die Stabilität des Einzelbaumes und des Bestandes sowie deren Schutzwirkung gegen Naturgefahren bestimmen und bewerten?

1.2 Literaturreview zur Baumstabilität

Die Aufmerksamkeit, die der Interaktion von Bäumen und Naturgefahren aus mechanischer Sicht zuteil wurde, widmet sich hauptsächlich der Wind- und Schneewirkung. Die Windwirkung wurde schon seit den späten 1940er Jahren untersucht (FRASER und GARDINER 1967), was andere Naturgefahren betrifft, sind noch immer viele Fragen zum mechanischen Verhalten von Bäumen offen.

Neben den klimatischen und standörtlichen Gegebenheiten haben verschiedene Baum- und Bestandeseigenschaften sowie Bewirtschaftungsmassnahmen einen Einfluss auf die Architektur der Bäume. Die gesamte Baumarchitektur und -struktur ist wichtig, um die Reaktion eines Baumes auf von aussen einwirkende Kräfte zu verstehen: neben der Kronenform und -dicke und der Stammform (z.B. h/D-Wert, das Verhältnis aus Baumhöhe und Brusthöhendurchmesser), spielt vor allem das Wurzelsystem eine entscheidende Rolle für die Stabilität eines Baumes (KÖNIG 1995; MÖHRING 1981; SCHMID-HAAS und BACHOFEN 1991; SCHMIDTKE und SCHERRER 1997; WASSER und FREHNER 1996).

In zahlreichen Untersuchungen wurden zur Erforschung der mechanischen Stabilität die Bäume umgezogen und dabei die Auslenkung der Bäume sowie die erforderliche Kraft gemessen (BRÜCHERT *et al.* 2000; COUTTS *et al.* 1999; FRASER und GARDINER 1967; MOORE 2000; PELTOLA *et al.* 2000). Aus diesen Untersuchungen geht hervor, dass der Boden und die Durchwurzelung einen sehr grossen Einfluss auf die Standfestigkeit besitzen (COUTTS 1986).

1.3 Mechanik des Wurzelsystems

Im Gegensatz zu den anderen Funktionen der Wurzeln wie Wasser- und Nährstoffaufnahme und -transport, wurde bis vor kurzem einer exakten Beschreibung der mechanischen Rolle der Baumwurzeln als Verankerung wenig Aufmerksamkeit geschenkt. Dies ist insofern überraschend, weil das Versagen der Verankerung bei Kulturpflanzen (Windwurf) als wirtschaftlicher Schaden bedeutsam ist (CROOK und ENNOS 1996). Um die Versagens-

wahrscheinlichkeit für das Wurzelsystem vorherzusagen, benötigt man Wissen über die Belastung und Widerstandsfähigkeit, die durch die einwirkenden Kräfte von Wind, Steinschlag, Lawinen oder Rutschungen hervorgerufen werden. Das auftretende Biegemoment ist bei statischen Belastungen proportional zur Rotationssteifigkeit. Wenn ein Baum einer dynamischen Belastung ausgesetzt ist, kommt ein zusätzlicher Beitrag vom Massenträgheitsmoment der Rotationsbewegung der Wurzeltellermasse (BAKER 1995, BLACKWELL *et al.* 1990). Es werden demnach Daten über das maximale Biegemoment, die Rotationssteifigkeit, das Rotations-Trägheitsmoment und die angreifenden Kräfte benötigt, um die Stabilität des Wurzelsystems zu beschreiben. Bisher gibt es zwar einige Untersuchungen zum Biegemoment, aber fast keine Daten zur Rotationssteifigkeit (z.B. für Sitkafichte in NEILD und WOODS 1998).

Nach BLACKWELL *et al.* (1990) hängt das maximale Biegemoment von vier Komponenten ab, (1) der Masse des Wurzeltellers, (2) der Kohäsion des Bodens unter dem Wurzelteller, die aber nur am Anfang des Loslösungsprozesses wirkt, (3) der Zugfestigkeit der Wurzeln auf der Luv-Seite und (4) dem Biege- und Widerstand der leeseitigen Wurzeln in der Drehachse. Diese Komponenten sind alle abhängig von Standortbedingungen und jährlichen Variationen. COUTTS (1986) untersuchte die Beziehung zwischen diesen vier Komponenten für die Sitkafichte (*Picea sitchensis*) und folgerte, dass der Hauptbeitrag zum maximalen Biegemoment von den luvseitigen Wurzeln und der Masse des Wurzeltellers kommt. Um das maximale Biegemoment zu untersuchen, wurden von verschiedenen Forschergruppen Umziehversuche an Bäumen durchgeführt (ACHIM *et al.* 2003; CROOK und ENNOS 1996; FRASER und GARDINER 1967; MOORE 2000; PELTOLA *et al.* 2000). Das maximale Verankerungsmoment und die Anteile der Einzelkomponenten sind je nach Boden- und Wurzeltyp sehr verschieden (FRASER 1962; NIELSEN 1990). Welches die kritische Stammneigung ist, bei der bleibende Schäden im Baum entstehen, die die Stabilität verringern (z.B. Wurzelbruch), ist bislang nicht bekannt und

wird im laufenden Projekt untersucht.

Es wurden ebenfalls Untersuchungen zur Wurzelverankerung von Bäumen an Hängen durchgeführt: ACHIM *et al.* (2003) bemerkten, dass sich das maximale Biegemoment, das aufgewendet werden muss, um einen Baum hangabwärts umzuwerfen, kleiner war als für eine hangaufwärts gerichtete Bewegung. Als Gründe hierfür werden ein asymmetrisch gewachsenes Wurzelsystem und die Verlagerung des Drehpunktes vom Stamm weg vorgeschlagen (ACHIM *et al.* 2003); die Wurzelarchitektur der umgezogenen Bäume wurde allerdings nicht untersucht. Es wurden bisher keine Untersuchungen zur Steifigkeit des Boden-Wurzelsystems an Hängen durchgeführt, obwohl auf die Notwendigkeit hingewiesen wurde, diesen Parameter in mechanische Modelle einzubeziehen (NEILD und WOOD 1998).

Auch die Bodeneigenschaften spielen für die Grösse des maximalen Biegemoments eine Rolle (MATTHECK *et al.* 1997). Die Festigkeit des Bodens hängt von seinem Scherwiderstand ab, der wiederum vom Wassergehalt beeinflusst wird. Wegen der Änderung des Bodenwassergehalts im Jahresverlauf ändern sich die physikalischen Bodeneigenschaften wie z.B. die Kohäsionskräfte zwischen Boden und Wurzeln. Dies erklärt zum Teil, warum sich auch die Verankerungsfestigkeit des Baumes im Jahresverlauf ändert (CROOK und ENNOS 1996).

Der wichtigste Parameter für die Baumstabilität ist ohne Frage das Wurzelsystem. Die Steifigkeits-, Festigkeits- und Schwingungstests, die in diesem Projekt durchgeführt werden, liefern aber nicht nur Erkenntnisse über das Wurzelsystem, sondern auch über den Einfluss des Standortes auf die Baumstabilität und die Interaktion mit einwirkenden Kräften. Mit den Daten zur Baumgeometrie, Massenverteilung und den Boden-Wurzelparametern wird ein möglichst naturnahes Modell für die Einzelbaumstabilität im Gebirgswald erstellt. Dieses Modell wird weiterhin benutzt, um die Interaktion von Bäumen mit Naturgefahren zu beschreiben und die gewonnenen Erkenntnisse auch auf andere Standorte zu übertragen.

1.4 Adaptives Wachstum

Neben genetischen Anpassungen an bestimmte Standorte und Gegebenheiten, die verschiedene Typen und Wuchsformen von Baumarten hervorgerufen haben, existiert auch eine individuelle Anpassung der Einzelbäume an gewisse Standortseinflüsse, das adaptive Wachstum. Die Anpassung der Bäume an mechanische Einwirkungen (z.B. Schnee, Wind, aber auch Hangneigung) spielt eine zentrale Rolle für die Stabilität von Waldbeständen und deren Behandlung.

TELEWSKI (1995) erstellte eine systematische Abhandlung von windinduzierten physiologischen Reaktionen sowie Anpassungen der Kronen-, Stamm- und Wurzelarchitektur einerseits und der Modifikation von anatomischen und biomechanischen Eigenschaften andererseits. So zeigen sowohl Wurzeln als auch der Stamm holz-anatomische Veränderungen nach windinduzierten Schwingungen (SEUBERT HUNZIKER und NIEMZ 2002; TELEWSKI 1995). Die Auswirkungen von windinduzierten Baumschwingungen äussern sich in einer kompakteren Wuchsform des Baumes durch eine Wachstumszunahme am Stammfuss (JACOBS 1954) und veränderten mechanischen Holzeigenschaften (wie einer erhöhten Holzdicke). Das h/D-Verhältnis nimmt mit zunehmender Windexposition ab (NIELSEN 1990). Die im Projekt Baumstabilität durchgeführten Untersuchungen zur Baumarchitektur liefern also auch wichtige Grundlagen für das Verständnis der Interaktion zwischen Baum und Wind.

FAYLE (1976) beschrieb eine Abnahme des Dickenwachstum und eine reduzierte Bildung von Reaktionsholz in Wurzeln mit der Reduktion von windinduzierten Baumschwingungen. STOKES *et al.* (1995) zeigten, dass schon die Wurzeln von kleinen Bäumen (<1 m) ein durch Wind stimuliertes Dickenwachstum und eine nach der Windrichtung ausgerichtete Wurzelgeometrie aufweisen. Dieses adaptive Wurzelwachstum in sehr frühen Jahren kann für den Baum die Grundlage für eine gute Verankerung in späteren Jahren bilden. Die Hauptwurzeln können an der Stammbasis einen ovalen, abgerundet dreieckigen Querschnitt annehmen oder Doppel-T-Träger (engl. I-be-

am) ausbilden, die mit zunehmendem Abstand vom Stock in einen kreisförmigen Querschnitt übergehen (COUTTS *et al.* 1999; NICOLL und RAY 1996). Dieser Bereich wird als «Zone of Rapid Taper» (ZRT) bezeichnet und befindet sich, je nach Tiefgründigkeit des Bodens und der Stärke der physikalischen Belastung, innerhalb eines Radius von 0,5 bis 2 Meter von der Stockmitte.

Inwieweit die Form, Richtung und Querschnittsfläche der Wurzeln einen Einfluss auf die mechanische Stabilität des Baumes haben, wird im laufenden Projekt näher untersucht.

1.5 Waldbau

Die meisten Erkenntnisse zur Baumstabilität aus waldbaulicher Sicht stammen aus Untersuchungen von Plantagen oder Baumexpertisen an Stadtbäumen (WESSOLLY und ERB 1998). Die schnellwachsenden Plantagenbäume sind gegenüber Windwurf sehr anfällig (COUTTS und GRACE 1995), daher war das Ziel dieser Untersuchungen, Windschäden und Pflegeaufwand zu minimieren und die Wirtschaftlichkeit zu optimieren. Bei der Analyse der Auswirkungen der Waldpflege auf die Einzelbaumstabilität im Gebirgswald und der Maximierung der Schutzwaldleistung, deren Grenzen sowie deren Beurteilung gegenüber Naturgefahren, besteht allerdings noch Forschungsbedarf.

Die meisten in der Literatur beschriebenen Studien über die Auswirkungen verschiedener Bewirtschaftungsszenarien auf die Bestandesstabilität zeigen, dass frühe Durchforstungen und Pflegeeingriffe die Widerstandskraft der Bestände erhöhen können (CAMERON 2002; NIELSEN 1990; WILSON und OLIVER 2000). Unmittelbar nach einem Eingriff wird die Stabilität jedoch zunächst reduziert (OTT *et al.* 1997).

Die Fichte ist bezüglich Stabilität sicherlich die am besten untersuchte Baumart. Da Fichten aber vielfach auf Standorten, auf denen sie natürlicherweise nicht vorkommen, untersucht wurden, ist die Aussagekraft dieser Studien für subalpine Fichtenwälder oder montane Tannen-Fichtenwälder fraglich.

Im Projekt Baumstabilität wird die Wurzel-Bodenverankerung von verschieden strukturierten Fichtenbeständen mit unterschiedlichen Baumtypen untersucht und beurteilt. Diese Daten werden dann mit einfach messbaren Parametern auf Einzelbauebene und mit der Bestandesstruktur mittels eines bestehenden Waldwachstumsmodells in Beziehung gesetzt, um sie auf andere Bestände übertragen zu können.

Die Auswirkungen der Waldpflege auf die Schutzwaldleistung ist nur qualitativ bekannt, quantitative Grundlagen fehlen. So ist die folgende Frage Gegenstand dieses Teilprojektes: Welcher Nutzen im Hinblick auf die Schutzwirksamkeit wird durch welchen Kostenaufwand erreicht? Damit können Empfehlungen für eine effiziente Schutzwaldpflege gegeben werden. Durch die Analyse der Auswirkungen der Waldpflege auf die Baumstabilität im Schutzwald und das Einbringen dieser Resultate in ein bestehendes Bestandeswachstumsmodell und ein derzeit am SLF entwickeltes Steinschlagmodell, soll die Schutzwirksamkeit des Gebirgswaldes zunächst in Bezug auf Steinschlag beurteilt werden, im weiteren auch für andere Naturgefahren.

2 Methoden und erste Ergebnisse

Die mechanischen Tests wurden auf Untersuchungsflächen im subalpinen Fichtenwald bei Davos im Sommer 2003 und 2004 durchgeführt. Tabelle 1 zeigt einige grundlegende Daten zu den Versuchsflächen im Mattawald und Brüchwald.

Im Projekt Baumstabilität wurde neben Tests zur Steifigkeit und Festigkeit die Wirkung von Steinschlag auf Bäume untersucht, um Aussagen über die Schutzfunktion des Gebirgswaldes abzuleiten. Die Interaktion zwischen Baum und Stein muss verstanden wer-

den, bevor es möglich ist, die Schutzwirksamkeit des Waldes als eine Funktion der Bestandesdichte, Durchmesser- und Baumartverteilung, Baumart usw. zu definieren und zu berechnen. Mit den im Projekt durchgeführten Anpralltests (Steinschlagsimulation) erhält man Daten, um die Beziehung zwischen Auslenkung und Zeit zu berechnen, die als Input für die numerische Simulation der Interaktion zwischen Baum und Stein notwendig ist. Mit Hilfe dieser Modellierung bekommt man die Möglichkeit, die Abhängigkeit verschiedener Baumcharakteristika auf die Einzelbaumstabilität gegen Steinschlag zu definieren. Als nächster Schritt sollen diese Erkenntnisse in ein Steinschlagmodell integriert sowie mit einem bestehenden Bestandeswachstumsmodell ergänzt werden, um auch die Stabilität eines Bestandes beurteilen zu können.

2.1 Boden-Wurzel-Steifigkeit

Bei den weitgehend zerstörungsfreien Tests wird die Rotationssteifigkeit des Boden-Wurzel-Systems und die Biegefestigkeit des Stammes ermittelt. Dazu werden die Testbäume bis zu einer Auslenkung von maximal 2,5° auf 2 % der Baumhöhe gezogen und die Neigung gemessen. Anschliessend wurden einige der Bäume bis zum Versagen gezogen (Abb. 1). Nach dem Test wurde die genaue Massenverteilung im Stamm und in der Krone erfasst, sowie die Stammform vermessen. Diese Daten werden für ein Modell des Einzelbaumes benutzt und sind für die Beurteilung der Interaktionen von Bäumen mit Naturgefahren wichtig.

Die berechnete Steifigkeit sinkt mit zunehmender Neigung am Stammfuss ab (Abb. 2). Die Steifigkeit wurde im Modellansatz verwendet, um die Eigenfrequenz des Baumes zu berechnen. Sensibilitätsanalysen zeigen, dass

Tab. 1. Höhenlage, Exposition, Hangneigung, Bodentyp und Bestandesdichte der beiden Untersuchungsflächen.

Fläche	Höhe über NN [m]	Exposition	Hangneigung [°]	Boden	Bestandesdichte [Bäume ha ⁻¹]
Mattawald	1700	NW	30–35	podsolige	500
Brüchwald	1800	SO	25–35	Braunerde	500

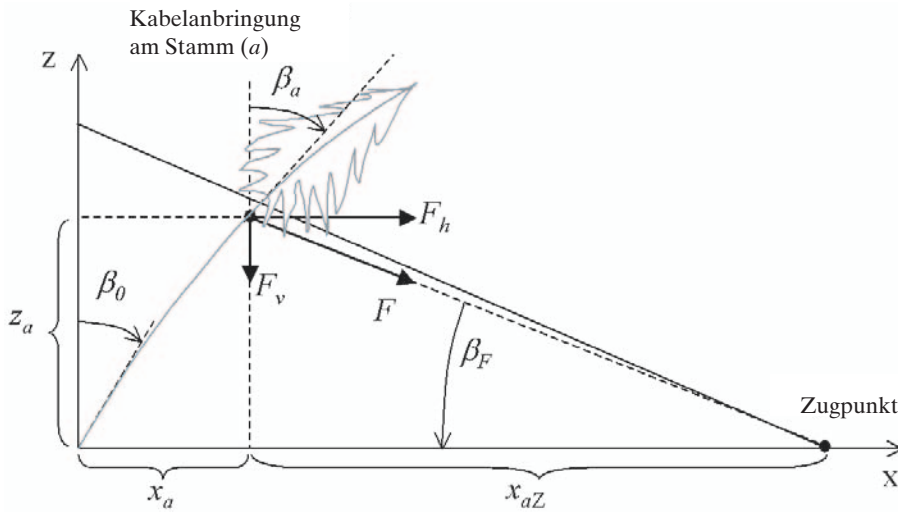


Abb. 1. Testanordnung bei den Zugtests an Fichte. β_a und β_0 = Auslenkung des Baumes, β_F = Zugwinkel, F , F_h , F_v = Zugkraft, horizontale und vertikale Kraft, x_a , x_{aZ} = Entfernung Stammfuß – Kabelanbringung bzw. Kabelanbringung – Zugpunkt, z_a = Anbringhöhe.

die Eigenfrequenz stark von der Rotationssteifigkeit des Wurzelsystems abhängt, was bedeutet, dass sich die Resonanz während eines Sturmes ändern kann, wenn die Steifigkeit absinkt. Die Frage ist, welche Stammneigungen während eines Sturmes auftreten, und ob sich die Eigenfrequenz des Baumes wegen Schädigungen im Wurzelsystem ändert. Erste Versuche haben gezeigt, dass sich die Eigenfrequenz und Elastizität des Baumes im Sommer und Winter unterscheiden.

Die Auswertungen zeigen, dass die Steifigkeit auch stark von der Baumarchitektur, also vom BHD, der Stammform und dem Kronenvolumen abhängt. Zum Beispiel korreliert die Steifigkeit bei $0,5^\circ$ Auslenkung mit dem BHD^2 und der Abholzigkeit des Stammes mit $r^2 = 0,95$.

Die Nachgiebigkeit der Wurzelbodenverankerung hängt von den Standortbedingungen und der Neigung des Stammes ab (Abb. 3). Zugversuche auf verschiedenen Standorten zeigen, dass

Fichten auf skelettreichen, flachgründigen podsoligen Braunerden in der subalpinen Stufe (Datensatz 3 in Abb. 3) weniger gut verankert sind als Fichten auf tiefgründiger Braunerde im Unterland (Datensatz 2 in Abb. 3). Durch die Steinschlagsimulationstests vorgeschädigte Bäume (Datensatz 4 in Abb. 3) zeigen eine deutlich geschwächte Wurzel-Bodenverankerung. Auch ein Einfluss der Bestandesdichte wird deutlich: Fichten in einem offenen Bestand sind besser verankert als Bäume mit gleichem BHD in einem geschlossenen Bestand.

Wenn zwei aufeinanderfolgende Tests zur Wurzelsteifigkeit durchgeführt werden, verringert sich die Wurzelsteifigkeit beim zweiten Test deutlich (Abb. 2, durchgezogene Linie = Schwingungstests, gestrichelte Linie = Steifigkeitstests). Nach Schwingungstests mit einer anfänglichen Zugneigung von bis zu 2° behielten die Bäume nach dem Test eine leichte Neigung bei. Dies könnte einerseits auf die Deformation des Bodens durch den Baum zurückzuführen sein, andererseits auf das Brechen von Wurzeln. Um ein mögliches Brechen der Wurzeln zerstörungsfrei belegen zu können, werden Saftflussmessungen am Stammfuß durchgeführt und die Veränderungen im Wasserfluss nach einem Test beurteilt. Ein abruptes Absinken im Saftfluss ist ein Indikator für das Abbrechen bzw. Abreißen von

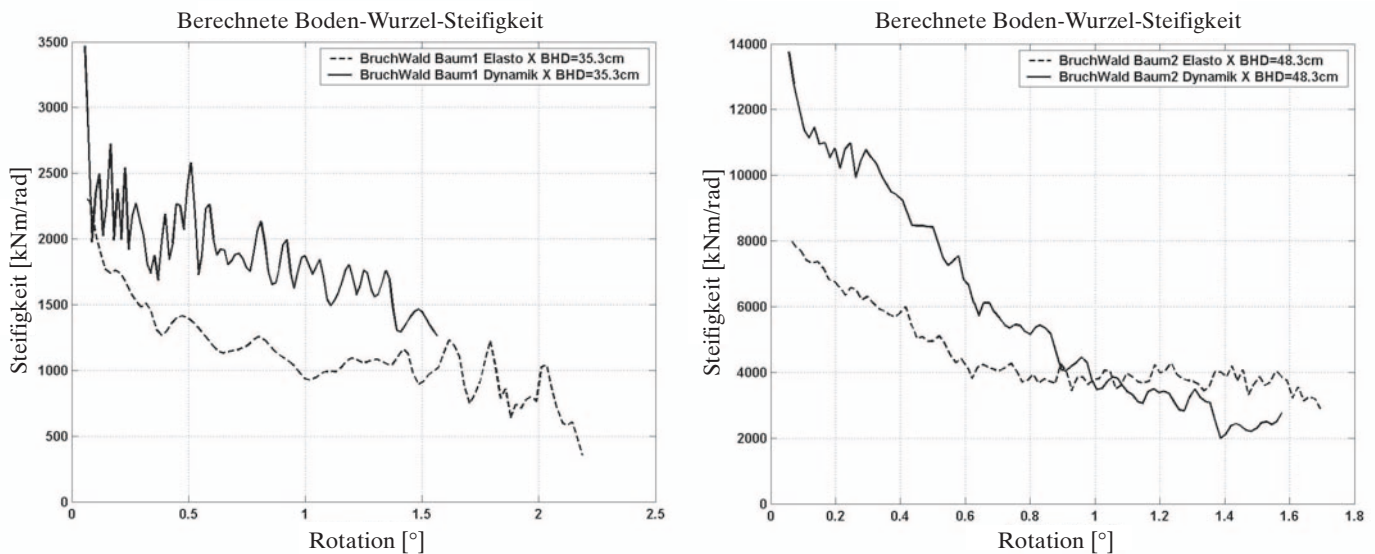


Abb. 2. Steifigkeit von zwei Fichten verschiedener Durchmesser aus dem Bruchwald. Durchgezogene Linie: berechnet aus Schwingungstests, gestrichelte Linie: berechnet aus Steifigkeitstests.

Wurzeln (RUST und GUSTKE 2001). Über die Dauer der Regeneration lässt sich ableiten, ob nur Feinwurzeln oder auch Strukturwurzeln geschädigt wurden: eine Schädigung von Feinwurzeln würde durch den schnellen Biomasseumsatz rasch kompensiert. Die Reaktion des Saftflusses auf Wurzelschäden wird zu einem späteren Zeitpunkt durch Freilegen und Abschneiden der Wurzeln direkt überprüft.

Bei ersten Versuchen, bei denen bis zu einer Neigung von 1,5 bzw. 2° am Stammfuß gezogen wurde, konnte kein Signal bei der Saftflussmessung gefunden werden, obwohl die Bäume nach dem Test einen Schiefstand von 0,2 bis 0,5° aufwiesen. Weitere Tests werden zeigen, welches die kritische Neigung ist, bei der Wurzeln brechen.

2.2 Anpralltests (Steinschlagsimulation)

Beim Prozess Steinschlag ist noch unbekannt, welche Energie ein Einzelbaum aufnehmen kann. Diese Lücke kann mit den im Wald durchgeführten Anprallversuchen geschlossen werden. Eine variable Anprallmasse wird entlang von Seilzügen den Hang hinunter beschleunigt und prallt zentrisch an den mit Beschleunigungsmessern versehenen Testbaum an. Zusätzlich wird die Verzögerung der Anprallmasse sowie die Anprallgeschwindigkeit aufge-

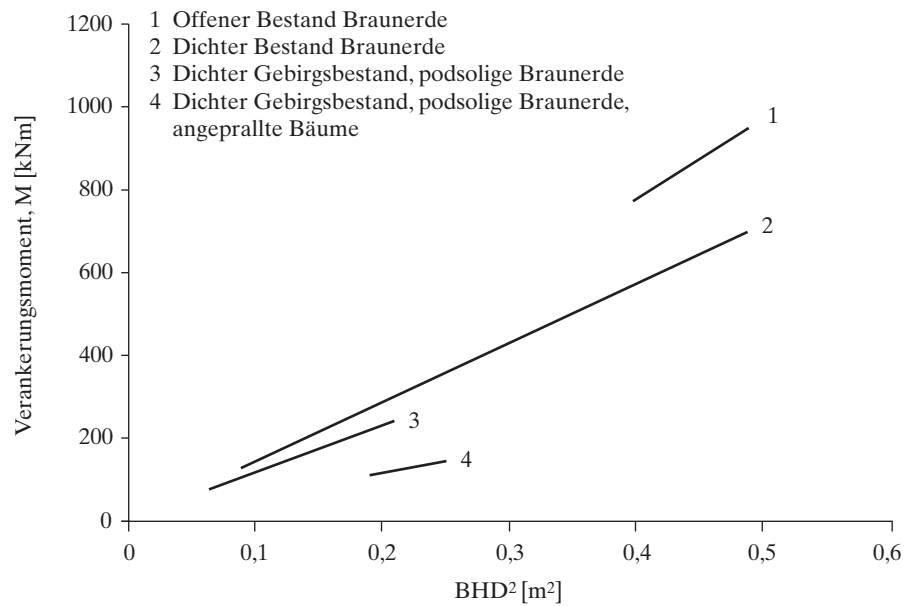


Abb. 3. Wurzel-Bodenverankerung in Abhängigkeit des Brusthöhendurchmessers (BHD²) für Fichten. Das Verankerungsmoment wurde aus Daten von Umziehversuchen auf den Flächen 1 und 2 (im Unterland bei Zürich) berechnet. Für die Flächen 3 und 4 (bei Davos) wurden vorhandene Daten und Koeffizienten für Eigengewicht und Kraft (aus Bildanalysen der Flächen 1 und 2) verwendet.

zeichnet. Aus Aufnahmen mit High Speed und Videokameras, bei denen Punktverschiebungen am Baum zeitlich verfolgt werden, lassen sich zusätzliche Daten zur Geschwindigkeit und Beschleunigung des Anprallwagens und der Baumreaktion gewinnen.

Die Energieabsorption des Baumes wird in Abbildung 4 beispielhaft für zwei der Testbäume dargestellt. Das Boden-Wurzelsystem nimmt 50%

oder mehr der Anprallenergie auf, abhängig von der Anprallhöhe sowie der Masse und Geschwindigkeit des Anprallkörpers.

Eine geringe Anprallhöhe erhöht die Energieabsorption des Baumes im Bodenwurzelsystem. Die Energieabsorption des noch stehenden Baumes nach einem Anprall ist eine Funktion seines Durchmessers und der Anprallhöhe (nicht dargestellt).

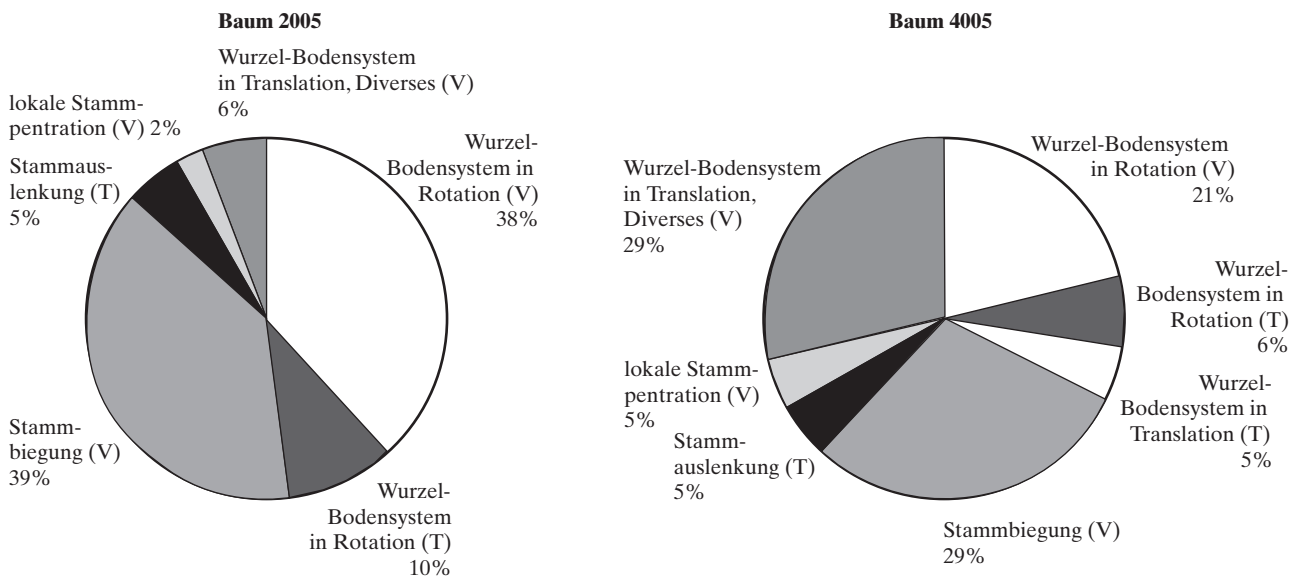


Abb. 4. Anteile der Energieabsorption der einzelnen Komponenten des Baumes am Beispiel der zwei Testbäume 2005 und 4005. V = Verformung, T = Trägheit.

2.3 Entwicklung von Analysemethoden

Die Auswertungssoftware PicEval (SLF) wurde speziell entwickelt, um Baumauslenkungen zu evaluieren. Diese Software kann für statische und dynamische Tests oder bei der Interaktion des Baumes mit Naturgefahren verwendet werden. Die Verzerrung im Bild wird berücksichtigt, so dass auch Bilder ausgewertet werden können, die mit einem Weitwinkelobjektiv aufgenommen wurden, wie etwa Bilder des gesamten Baumes. Als einziger Input werden die Kameraposition in Relation zum Baum und die Brennweite benötigt. Mit Hilfe dieser Software können Stabilitätsparameter auf einfache Art erhoben werden, ohne dass Bäume umgezogen werden müssen.

2.4 Wurzeluntersuchungen

Alle bisher im Projekt gewonnenen Ergebnisse unterstreichen die Bedeutung des Wurzelsystems für die Stabilität des Baumes. Deswegen werden an den Testbäumen Untersuchungen zur Wurzelarchitektur durchgeführt. Die Wurzeln werden freigelegt und die Richtung und Stärke der Hauptwurzeln erfasst. Die Wurzelquerschnittsflächen (WQA) der Hauptwurzeln werden im Abstand von 0,5, 0,75, 1,0 und 1,25 m vom Stamm bestimmt, die Form der Wurzeln vermessen und die Exzentrizität der Jahrringe aufgenommen.

Auch die Form der Wurzelanläufe wird vermessen, da dies eine Grösse ist, die am stehenden Baum gemessen werden kann und so für die Beurteilung der Baumstabilität in der Praxis brauchbar wäre.

Zusammenhänge zwischen der Grobwurzelarchitektur, des WQA der Wurzeln und der Wurzelanläufe mit der Wurzelsteifigkeit und Verankerung sollen untersucht werden.

2.5 Waldbau

Die Analyse der Auswirkungen der Waldpflege auf die Einzelbaumstabilität und die Schutzwirksamkeit wird am Beispiel des Steinschlagprozesses aufgezeigt. Das Teilprojekt Waldbau gliedert sich in drei Teile:

In einem ersten Teil wird ein bestehendes Waldwachstumsmodell angepasst, dessen Ziel es ist, die Auswirkungen von waldbaulichen Handlungsalternativen auf die Waldentwicklung, die Einzelbaumarchitektur und die relevanten Stabilitätseigenschaften der Bäume über längere Zeiträume zu simulieren.

Beim experimentellen Teil werden mit Hilfe von Baumzugversuchen Stabilitätseigenschaften von verschiedenen Baumtypen (schnell-/langsamwachsende, gross-/kleinkronige, usw.) mit unterschiedlichem Alter und Durchmesser ermittelt. Dabei werden Wurzel-, Stamm- und Kronenparameter erhoben sowie das Wachstumsverhalten dendrochronologisch bestimmt.

Für die Evaluation der Schutzwirksamkeit von Waldbeständen wird am SLF ein neuartiges, einzelbaumbasierendes Steinschlagmodell entwickelt. Die Schutzwirksamkeit soll dann in einer Kosten-Nutzen-Analyse dem finanziellen Aufwand der Schutzwaldpflege gegenübergestellt werden, um im weiteren Empfehlungen für eine effiziente Waldpflege geben zu können.

3 Diskussion

3.1 Einfluss der Kronenarchitektur und Stammform auf die Stabilität

Die Ergebnisse zur Boden-Wurzel-Steifigkeit zeigen wie erwartet einen engen Zusammenhang mit der Baumarchitektur, vor allem die Stammform, BHD und das Kronenvolumen korrelieren gut mit der Steifigkeit. Es kann damit bestätigt werden, dass eine bestimmte Baumarchitektur (z. B. abholzige Stammformen) stabiler ist. Abholzige Stämme sind zum Beispiel auch resistenter gegen Schneedruckschäden als vollholzige, wie schon von mehreren Autoren angegeben wurde (CHROUST 1980; ROTTMANN 1985; THOMASIU 1988). Abholzige, dicke Stämme stehen in einer engen Beziehung mit einem gut ausgebildeten Wurzelwerk und einer grossen Krone (KRAMER 1988; KUHR 1999), und daher offensichtlich auch mit einer grösseren Boden-Wurzel-Steifigkeit. Die Konkurrenz im Bestand wirkt sich vor

allem auf das Dickenwachstum der Stämme und nur wenig auf das Höhenwachstum aus (KRAMER 1988). Daher können h/D-Werte kleiner als 80 und somit stabilere Bäume durch frühe und starke Pflegeeingriffe erreicht werden (CAMERON 2002; CHROUST 1980; MITCHELL 2000; THOMASIU 1988), wodurch voraussichtlich die Boden-Wurzel-Steifigkeit in einem Bestand verbessert werden kann. Genauere Ergebnisse zur Steifigkeit von Bäumen in gepflegten und un gepflegten Beständen werden bis zum Projektende vorliegen und als Grundlage für Pflegeempfehlungen dienen.

Zwischen der Kronenlänge und der Stammform insbesondere dem h/D-Wert, besteht ein enger Zusammenhang (ROTTMANN 1985). FRASER und GARDINER (1967) beschreiben einen Zusammenhang zwischen der Kronenprojektionsfläche und der Ausdehnung des Wurzeltellers in Abhängigkeit des Standortes; dies wird von NIELSEN (1990) und BOLENIKUS (2001) bestätigt.

Weitere Zusammenhänge zwischen der Baum- und Wurzelarchitektur und der Stabilität der Fichten im Gebirgs-wald werden zur Zeit ausgewertet.

3.2 Adaptives Wachstum

Die Verankerungskraft eines Baumes gegen Windwurf lässt sich nach BOLKENIUS (2001) aus dem Radialzuwachs der Seitenwurzeln innerhalb der «Zone of Rapid Taper» und der Tiefendurchwurzelung in der Nähe des Wurzelstocks ableiten. Gute Korrelationen zur Verankerungskraft liefert laut Literaturwerten das Wurzelquerschnittsareal (WQA) im Radius von 0,5 m von der Stockmitte (BOLENIKUS 2001; COUTTS 1983). Der Verankerung im Boden dienen in erster Linie die Skelettwurzeln (KRAMER 1988), daher wurden bei den hier durchgeführten Untersuchungen vor allem die Wurzeln über 10 cm Durchmesser betrachtet und das WQA in verschiedenen Abständen vom Stamm untersucht.

Der Beitrag der Wurzeln zur Verankerung von Fichten, vor allem in Hanglagen, kann mit den Untersuchungen zur Wurzelarchitektur besser quantifiziert werden. Erste Ergebnisse zeigen,

dass die Tiefgründigkeit des Bodens einen Einfluss hat: Bäume auf flacheren, steinigere Böden weisen eine signifikant höhere Steifigkeit auf ($r^2 = 0,88$). Weitere Untersuchungen werden zeigen, ob eine grössere Wurzelsteifigkeit eher mit einer grösseren Wurzelquerschnittsfläche erreicht wird oder mit einer anderen Anzahl und Verteilung der Wurzeln. Die Zusammenhänge zwischen der Wurzelarchitektur und der Boden-Wurzel-Steifigkeit stellen eine wichtige Grundlage dar, um die Baumstabilität im Bergwald besser beurteilen zu können. Bisher ist die Verankerung der Bäume im Gebirgswald noch nicht ausreichend untersucht, und es kann noch nicht statistisch abgesichert werden, ob und welche Unterschiede zu Bäumen im Flachland auftreten.

WEISBRICH (2001) suchte in seiner Arbeit nach Relationen zwischen oberirdischen und unterirdischen Merkmalen und der Sturmstabilität bei Fichten. Dabei stellten sich die Form des Wurzelanlaufes und die Ovalität des Stammes als gute Weiser der Wurzelstruktur und der Sturmstabilität heraus. Dies wird im laufenden Projekt überprüft, da die Wurzelanläufe einfach zu messende Parameter sein könnten, die die Verankerung des Baumes gut beschreiben und in der Praxis zur Stabilitätsbeurteilung dienen können.

3.3 Schutzwirkung des Waldes gegen Naturgefahren am Beispiel Steinschlag

Wie muss ein Schutzwald aufgebaut sein, damit er optimal und nachhaltig vor Steinschlag schützt? Zum einen sind je nach Energie eines Steines dickere oder dünnere Baumdurchmesser nötig, um einen Stein wirksam zu bremsen. Die Stammzahl sollte möglichst gross sein, um die Anzahl Baumtreffer zu maximieren (GSTEIGER 1993). Es handelt sich bei der Erreichung der optimalen Waldwirkung gegenüber Steinschlag also um ein Optimierungsproblem zwischen der Maximierung der Stammzahl und der Maximierung der Baumdurchmesser. Nicht nur starke Bäume, sondern auch viele schwache Stämme können eine effektive Schutzwirkung besitzen (GERBER und ELSENER 1998). Ausser-

dem soll für eine optimale Schutzwirkung die Bestandesstruktur auf kleiner Fläche ungleichaldrig, stufig und damit nachhaltig und stabil aufgebaut sein (WASSER und FREHNER 1996).

Die Abhängigkeit der Energieabsorption eines Baumes von seinem Durchmesser wurde im Projekt Baumstabilität gemessen und kann für einen Bestand modelliert werden. Folglich lassen sich für gegebene Steinschlagintensitäten Mindestdurchmesser als waldbauliche Zielgrösse ableiten. Die Erkenntnisse aus den Versuchen am Einzelbaum können mit Hilfe von Waldwachstums- und Steinschlagmodellen auf die Bestandesebene übertragen werden. Somit kann die Schutzwaldleistung für verschiedene Waldzustände (Pflegekonzepte) analysiert werden. Diesem Nutzen können die Kosten für Schutzwaldpflege gegenübergestellt werden und so die Wirksamkeit von waldbaulichen Massnahmen abgeschätzt werden.

3.4 Ausblick: weiterer Forschungsbedarf

Mit den vorhandenen Daten zur Baumstabilität und Literaturwerten zu Windprofilen können Analysen zum Verhalten des Einzelbaumes bei Windwirkung durchgeführt und neue Erkenntnisse zur Interaktion zwischen Wind und Baum gewonnen werden. Untersuchungen dieser Art wurden schon von verschiedenen Forschergruppen durchgeführt (BAKER 1995; PÄÄTALO *et al.* 1999; PELTOLA *et al.* 1999), aber noch nicht für subalpine Wälder.

Vor allem die im Gebirge häufig anzutreffende Rottenstruktur wurde im Projekt Baumstabilität in Bezug auf ihre Stabilität noch nicht untersucht, hier besteht noch Forschungsbedarf. Auch wann ein Jungwald im Stande ist, die an ihn gestellten Schutzerfordernungen zu erfüllen, ist eine offene Frage. Die entwickelten Test- und Analysemethoden (wie z.B. die Software PicEval) sollten in Zukunft auch für andere Baumarten (z.B. Buche, Lärche) und andere Standorte eingesetzt werden, um umfassendere Informationen über Gebirgswälder zu erhalten.

Der Einfluss des Waldzustandes oder unterschiedlicher Waldbehandlungen auf die Schutzwaldleistung ist vielfach nicht bekannt, so dass dem Pflegeaufwand kein quantifizierbarer Nutzen gegenübergestellt werden kann. Der erste Schritt für eine ökonomische Optimierung der Schutzwaldpflege wird im laufenden Projekt gemacht.

4 Literatur

- ACHIM, A.; NICOLL, B.C.; MOCHAN, S.; GARDINER, B., 2003: Wind Stability of Trees on Slopes. In: WILHELM, G. (ed) Wind Effects on Trees. Laboratory for Building- and Environmental Aerodynamics, Inst. for Hydromechanics, University of Karlsruhe, Germany. 231–237.
- BAKER, C.J., 1995: The development of a theoretical model for the windthrow of plants. *J. Theor. Biol.* 175: 355–372.
- BLACKWELL, P.G.; RENNOLLS, K.; COUTTS, M.P., 1990: A Root Anchorage Model for Shallowly Rooted Sitka Spruce. *Forestry* 63: 73–92.
- BOLKENIUS, D., 2001: Zur Wurzelbildung von Fichte (*Picea abies* L. [Karst]) und Weisstanne (*Abies alba* Mill.) in gleich- und ungleichaltrigen Beständen. *Ber. Freibg. Forstl. Forsch.* 35: 155 S.
- BRÜCHERT, F.; BECKER, G.; SPECK, T., 2000: The mechanics of Norway spruce *Picea abies* (L.) Karst: mechanical properties of standing trees from different thinning regimes. *For. Ecol. Manage.* 135: 45–62.
- CAMERON, A.D., 2002: Importance of early selective thinning in the development of long-term stand stability and improved log quality: a review. *Forestry* 75: 25–35.
- CHROUST, L., 1980: Erziehung von den durch Schnee und Wind gefährdeten Fichtenbeständen. In: KRAMER, H. (ed) Biologische, technische und wirtschaftliche Aspekte der Jungbestandespflege. Frankfurt am Main, J. D. Sauerländer's Verlag. 206–213.
- COUTTS, M.P., 1983: Root Architecture and Tree Stability. *Plant Soil* 71: 171–188.
- COUTTS, M.P., 1986: Components of Tree Stability in Sitka Spruce on Peaty Gley Soil. *Forestry* 59: 173–198.
- COUTTS, M.P.; GRACE, J., 1995: Wind and Trees. Cambridge, Cambridge University Press.

- COUTTS, M.P.; NIELSEN, C.C.N.; NICOLL, B.C., 1999: The development of symmetry, rigidity and anchorage in the structural root system of conifers. *Plant Soil* 217: 1–15.
- CROOK, M.J.; ENNOS, A.R., 1996: The anchorage mechanics of deep rooted larch, *Larix europea* x *L. japonica*. *J. Exp. Bot.* 47: 1509–1517.
- FAYLE, D.C.F., 1976: Stem sway affects ring width and compression wood formation in exposed root bases. *For. Sci.* 22: 193–194.
- FRASER, A.I., 1962: The soil and roots as factors in tree stability. *Forestry* 35: 117–127.
- FRASER, A.I.; GARDINER, J.H.B., 1967: Rooting and stability in Sitka spruce. *U.K. For. Comm. Bull.* 40: 28.
- GERBER, C.; ELSENER, O., 1998: Niederwaldbetrieb im Steinschlaggebiet. *Wald Holz* 14: 8–11.
- GSTEIGER, P., 1993: Steinschlagschutzwald – Ein Beitrag zur Abgrenzung, Beurteilung und Bewirtschaftung. *Schweiz. Z. Forstwes.* 144: 115–132.
- JACOBS, M.R., 1954: The Effect of Wind Sway on the Form and Development of *Pinus radiata* D. Don. *Aust. J. Bot.* 2: 35–51.
- KÖNIG, A., 1995: Sturmgefährdung von Beständen im Altersklassenwald: ein Erklärungs- und Prognosemodell. Frankfurt a. M., Sauerländer.
- KRAMER, H., 1988: Waldwachstumslehre. Hamburg und Berlin, Paul Parey.
- KRUMMENACHER, B.; KEUSEN, H.R., 1997: Steinschlag-Stutzbahnen – Modell und Realität. Paper presented at the Société Suisse de Mécanique des sols et des roches. Réunion d'automne., Montreux.
- KUHR, M., 1999: Grobwurzelarchitektur in Abhängigkeit von Baumart, Alter, Standort und sozialer Stellung. Dissertation, Georg-August-Universität Göttingen.
- MARGRETH, S., 2004: Die Wirkung des Waldes bei Lawinen. *Forum für Wissen* 2004: 21–26.
- MATTHECK, C.; TESCHNER, M.; SCHÄFER, J., 1997: Mechanical Control of Root Growth: A Computer Simulation. *J. Theor. Biol.* 184: 261–269.
- MITCHELL, S.J., 2000: Stem growth responses in Douglas fir and Sitka spruce following thinning: implications for assessing wind-firmness. *For. Ecol. Manage.* 135: 105–114.
- MÖHRING, B., 1981: Über den Zusammenhang zwischen Kronenform und Schneebruchanfälligkeit bei Fichte. *Forstarchiv* 52: 130–134.
- MOORE, J.R., 2000: Differences in maximum resistive bending moments of *Pinus radiata* trees grown on a range of soil types. *For. Ecol. Manage.* 135: 63–71.
- NEILD, S.A.; WOOD, C.J., 1998: Estimating stem and root-anchorage flexibility in trees. *Tree Physiol.* 19: 141–151.
- 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., 1990: Einflüsse von Pflanzabstand und Stammzahlhaltung auf Wurzelform, Wurzelbiomasse, Verankerung sowie auf die Biomasseverteilung im Hinblick auf die Strumfestigkeit der Fichte. Frankfurt a. M., Sauerländer.
- OTT, E.; FREHNER, M.; FREY, H.-U.; LÜSCHER, P., 1997: Gebirgsnadelwälder: Ein praxisorientierter Leitfaden für eine standortgerechte Waldbehandlung. Bern, Stuttgart Wien, Paul Haupt.
- PÄÄTALO, M.L.; PELTOLA, H.; KELLOMAKI, S., 1999: Modelling the risk of snow damage to forests under short-term snow loading. *For. Ecol. Manage.* 116: 51–70.
- PELTOLA, H.; KELLOMAKI, S.; VAISANEN, H.; IKONEN V.P., 1999: A mechanistic model for assessing the risk of wind and snow damage to single trees and stands of Scots pine, Norway spruce, and birch. *Can. J. For. Res.* 29: 647–661.
- PELTOLA, H.; KELLOMAKI, S.; HASSINEN, A.; GRANANDER, M., 2000: Mechanical stability of Scots pine, Norway spruce and birch: an analysis of tree-pulling experiments in Finland. *For. Ecol. Manage.* 135: 143–153.
- RICKLI, C.; GRAF, F.; GERBER, W.; FREI, M.; BÖLL, A., 2004: Der Wald und seine Bedeutung bei Naturgefahren geologischen Ursprungs. *Forum für Wissen* 2004: 27–34.
- ROTTMANN, M., 1985: Schneebruchschäden in Nadelholzbeständen – Beiträge zur Beurteilung der Schneebruchgefährdung, zur Schadensvorbeugung und zur Behandlung schneegesetziger Nadelholzbestände. Frankfurt am Main, Sauerländer.
- RUST, S.; GUSTKE, B., 2001: Saffflussmessung zeigt Wurzelschäden durch Baumassnahmen auf. *Landschaftsarchitektur* 12: 12–13.
- SCHMID-HAAS, P.; BACHOFEN, H., 1991: Die Sturmgefährdung von Einzelbäumen und Beständen. *Schweiz. Z. Forstwes.* 142: 477–504.
- SCHMIDTKE, H.; SCHERRER, H.-U., 1997: Sturmschäden im Wald. Zürich, vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich.
- SEUBERT HUNZIKER, H.; NIEMZ, P., 2002: Mikroskopische Charakterisierung von Winddruckstauchungen. Interner Bericht ETHZ/HW-HP-LZfP 10: 1–20.
- STOKES, A.; FITTER, A.H.; COUTTS, M.P., 1995: Responses of young trees to wind and shading: effects on root architecture. *J. Exp. Bot.* 46: 1139–1146.
- TELEWSKI, F.W., 1995: Wind-induced physiological and developmental responses in trees. In: GRACE, J. (ed) *Wind and Trees*. Cambridge, Cambridge University Press. 241–263.
- THOMASIU, H., 1988: Stabilität natürlicher und künstlicher Waldökosysteme sowie deren Beeinflussbarkeit durch forstwirtschaftliche Massnahmen. *Allg. Forst Z. Waldwirtsch. Umweltvorsorge* 43: 1037–1043, 1064–1068.
- WASSER, B.; FREHNER, M., 1996: Wegleitung: Minimale Pflegemassnahmen für Wälder mit Schutzfunktion. Bern, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL).
- WEISBRICH, F.J.F., 2001: Der Wurzelanlauf von Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.) als Weiser der Wurzelstruktur und Sturmstabilität. Diplomarbeit, Universität Göttingen.
- WESSOLLY, L.; ERB, M., 1998: Baumstatik und Baumkontrolle. Berlin, Patzer Verlag.
- WILSON, J.S.; OLIVER, C.D., 2000: Stability and density management in Douglas-fir plantations. *Can. J. For. Res.* 30: 910–920.