

Zeitschrift: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss forestry journal = Journal forestier suisse

Herausgeber: Schweizerischer Forstverein

Band: 158 (2007)

Heft: 6

Artikel: Mechanische Eigenschaften der Fichte : Experimente zur Analyse von Naturgefahren

Autor: Kalberer, Matthias / Ammann, Martin / Jonsson, Martin

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1097926>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 02.05.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Mechanische Eigenschaften der Fichte: Experimente zur Analyse von Naturgefahren

Matthias Kalberer Eidg. Forschungsanstalt WSL (CH) und BINA Engineering SA (CH)*
Martin Ammann Eidg. Forschungsanstalt WSL (CH) und Ammann Ingenieurbüro (CH)
Martin Jonsson Eidg. Forschungsanstalt WSL (CH) und Berg Bygg Konsult AB (SE)

Mechanical properties of Norway spruce: Experiments for the analysis of natural hazards

Among others, the protective effect of the forest against natural hazards is mostly co-determined through the mechanical stability of the trees. Despite this, there is a lack of quantifiable knowledge regarding the mechanical interaction between the trees, the forest and natural hazards. With experiments conducted on spruce trees, and mechanical modelling of trees and tree trunks, the mechanical properties and the energy absorption capacity for a single tree during a rock impact were determined. It was shown that the anchorage properties correlated well with the volume of the tree stem. The four-point bending tests and the dynamic impact tests enabled us to determine the strength of the tree stems. Furthermore, the obtained values for the strength of the tree stems were strongly affected by the wood quality and sometimes deviated substantially from the established material properties of dried wood used for buildings. The behavior of trees when impacted by rocks could be simulated with full-scale impact tests and the energy absorption capacity quantified. These experiments gave important knowledge of how to analyze the interaction between natural hazards, trees and forests, with the focus on Norway spruce. However, to quantify the protection effect of the forest against natural hazards, more experiments on different tree species are required.

Keywords: tree stability, energy absorption, anchorage strength, mechanical tree properties, natural hazards
doi: 10.3188/szf.2007.0166

* Postfach, CH-3946 Turtmann, E-Mail matthias.kalberer@binasa.ch

Die Schutzwirkung des Waldes gegenüber Naturgefahren ist vielseitig und schon seit langem anerkannt. So wurden bereits im 14. Jahrhundert die ersten Schutzwälder mit so genannten Bannbriefen vor Abholzung geschützt. Mit der schweizerischen Forstgesetzgebung von 1876 wurde die gesetzliche Grundlage für den flächenmässigen Schutz und die Sanierung der damals übernutzten Gebirgswälder sowie für Neuaufforstungen zur Vermeidung von Naturgefahren geschaffen. Noch ungenügend erkannt wurde jedoch, dass die Walderhaltung alleine zur Sicherstellung ihrer Schutzwirkungen nicht genügt (Leibundgut 1986). Der gesamte volkswirtschaftliche Wert der Schutzwirkung des Schweizer Waldes wird mittlerweile auf vier bis fünf Milliarden Franken pro Jahr geschätzt (Brändli 1999). Durch das starke Wachstum der Zivilisationsfläche ist die Bedeutung des Schutzwaldes laufend angestiegen. Zehntausende von Menschen, Verkehrsanlagen, andere Infrastrukturen und 7000 Hektaren Industrie- und Siedlungszonen mit insgesamt 130000 Gebäuden werden durch den Wald vor Naturgefahren wie Steinschlag, Lawinen

und Rutschungen geschützt (BUWAL 2002). In den letzten Jahren vermochten die Holzerlöse die Erntekosten nicht mehr zu decken, weshalb ein Grossteil der Gebirgswälder nicht mehr genutzt wurden. Damit steigt die Gefahr, dass die Schutzwälder überaltern und sie, da die Waldverjüngung ungenügend ist, ihre Schutzwirkung nicht mehr nachhaltig erfüllen können.

Über die Schutzwirkung von Wäldern gegen Naturgefahren und im Speziellen über die Stabilität von Einzelbäumen existierte bis vor kurzem nur wenig quantitatives Wissen (Brang et al 2004). Mit den bestehenden Steinschlagmodellen konnte beispielsweise die Schutzwirkung von Wäldern gegen Steinschlag nur ungenau abgeschätzt werden, weil die den Programmen zugrunde liegenden mechanischen Baumeigenschaften¹ unbekannt waren. So konnten auch Auswirkungen von Pflegemassnahmen nur ansatzweise evaluiert und die optimale Schutzwaldstruktur lediglich erraten werden. Des-

¹ zum Beispiel Energieabsorptionsvermögen bei Steinschlag in Abhängigkeit des Baumdurchmessers und der Trefferhöhe

halb wurde im Jahr 2000 das Projekt «Naturereignisse und Baumstabilität» am Eidgenössischen Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF) lanciert, um die Wechselwirkungen zwischen Naturereignissen und Wald zu erforschen (Foetzki et al 2004). In Zusammenarbeit mit dem Cemagref in Grenoble und den Universitäten Bern, Barcelona und Wien wurde das Projekt «Rockfor»,² welches sich mit dem Steinschlag befasst, gestartet (Berger et al 2002). Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen dieser Forschungsprojekte und widmet sich den mechanischen Eigenschaften der Fichte.

Die mechanischen Eigenschaften von Bäumen

Die Interaktion zwischen Bäumen und Naturgefahren wurde bisher hauptsächlich in Bezug auf Schnee- und Windwirkung untersucht. Fraser (1962) analysierte erstmals die Verankerungseigenschaften von Bäumen mittels Umziehversuchen, bei denen er Bäume durch seitlichen Zug zum Kippen brachte und dabei die erforderliche Kraft sowie die Auslenkung aufzeichnete. Bis heute wurden solche statischen Experimente von verschiedenen Autoren zur Untersuchung der mechanischen Stabilität von Einzelbäumen angewendet (Coutts 1983, Nielsen 1990, Fredericksen et al 1993, Brüchert et al 2000, Peltola et al 2000, Bolenikus 2001, Stokes et al 2005, Jonsen et al 2006). In der Natur verlaufen die Einwirkungen auf Bäume jedoch meist dynamisch (Steinschlag, Lawinen, Stürme) und nicht statisch. Werden Stabilitätskennwerte aus statischen Versuchen zur Analyse von dynamischen Prozessen eingesetzt, wird ein systematischer Fehler begangen. Nielsen (1990) schätzt, dass Bäume unter dynamischer Einwirkung einer um ein Vielfaches höheren Belastung standhalten als bei statischer Einwirkung.

Mit statischen Umziehversuchen konnte gezeigt werden, dass verschiedene Boden- und Wurzelparameter die Verankerungsstabilität beeinflussen (Coutts 1986). Die Verankerungsstabilität und die Wurzelparameter korrelieren auch gut mit oberirdischen Baummerkmalen wie Stammgewicht, Stammvolumen, Basalfläche oder der Kronengrundfläche (Fredericksen et al 1993). Die Architektur der Bäume wird neben klimatischen und standörtlichen Gegebenheiten sowie verschiedenen Baum- und Bestandeseigenschaften auch durch Bewirtschaftungsmassnahmen geprägt. In der Literatur ist man sich einig, dass starke Durchforstungen in der Jugend und Durchforstungsrufe im Alter die beste Strategie sind, um widerstandsfähige Waldbestände zu erziehen (Andersson 1980, Chroust 1980, Nielsen 1990, Slodicak 1995, Cameron 2002). Durch frühe starke Durchforstungen wird vor allem das Dicken-

wachstum der Bäume gefördert, die Verkürzung der Krone verhindert und das Wurzelwerk gestärkt. Schon früh werden so stabile, abholzige Stämme (niedriger h/d-Wert) erzogen, welche bis ins hohe Alter erhalten bleiben. Mit zunehmender Bestandeshöhe werden Waldbestände verstärkt windwurfgefährdet. Bedingt durch das hohe physiologische Alter können sich die einzelnen Bäume nur sehr langsam den erhöhten Einwirkungen durch Wind und Schnee anpassen. Aus diesem Grund ist die Hoffnung, in überdichten, labilen Beständen mit verspäteten Durchforstungen die Bestandesstabilität zu erhöhen, gering. Zudem sind solche Eingriffe für die Bestände sehr riskant (Johann 1981, Wilson & Oliver 2000). Deshalb sollen solche Bestände nicht mehr durch starke Durchforstungseingriffe unnötig geschwächt werden.

Waldwirkung und Steinschlag

Die Schutzwirkung eines Waldes gegen Steinschlag beruht vor allem auf der Energieabsorption bei Kollisionen von abstürzenden Steinen mit Bäumen. Doch wie viel Energie kann ein Baum bei einem Steintreffer absorbieren? Während kleine Steine ($\varnothing < 1.5$ m) durch einen Waldbestand wirkungsvoll gestoppt werden, stürzen mehrere Kubikmeter grosse Steine ($\varnothing > 2.5$ m) praktisch ungebremst durch einen Wald. Wo liegen die Grenzen der Schutzwirksamkeit eines Waldes?

Jahn (1988) untersuchte den Waldeinfluss auf Steinschlag erstmals mit Feldexperimenten. Auf zwei benachbarten 35.5° steilen Sturzbahnen mit und ohne Wald wurden insgesamt 132 Steine mit einer durchschnittlichen Masse zwischen 23.5 kg und 29.5 kg in Bewegung gesetzt. Der Wald bestand aus zum Teil sehr dichtem Stangenholz. Mit diesen Versuchen konnte unter anderem gezeigt werden, dass die Walddichte einen Einfluss auf die Ablagerungsrate, die maximale Geschwindigkeit und folglich auch auf die Reichweite der Steine hat. Ähnliche Resultate lieferten die Feldversuche, die im Rahmen des Rockfor-Projektes mit wesentlich grösseren Steinen (mittlerer Durchmesser: 0.95 m, mittleres Gewicht zirka 1250 kg) in Frankreich durchgeführt wurden (Le Hir et al 2004, Dorren et al 2005). Durch die Analyse der Bewegung der Steine und der Baumtreffer mit Videokameras konnte die Energieabsorption der getroffenen Bäume berechnet werden (Dorren & Berger 2006).

Material und Methoden

Die Baum-Stein-Interaktion beim Steinschlagprozess ist hochkomplex. Um diesen Teilprozess der Interaktion genau beschreiben zu können, müssen die Reaktion eines Baumes und die Reaktion der einzelnen Baumteile (Wurzel, Stamm und Krone) bei

² «Efficiency of the Protective Function of Mountain Forest Against Rockfall»

einem Steintreffer bekannt sein. Dazu muss man die mechanischen Eigenschaften der einzelnen Baumteile kennen. Sind diese bekannt, kann mit physikalischen Berechnungsmodellen die Energieabsorption eines Baumes bei einem Steinschlagtreffer berechnet werden. Dazu wurden am SLF und in den umliegenden Wäldern von Davos verschiedene Versuche zur Ermittlung der mechanischen Eigenschaften der Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.) durchgeführt. Mit quasi-statischen Umziehversuchen wurde das Verankerungsmoment in Abhängigkeit der Stammfussrotation analysiert. Die Biegesteifigkeit und das Spannungsdehnungsverhalten an Stammabschnitten frisch gefällter Fichten wurden mit statischen Vierpunktbiegeversuchen untersucht. Auf einer Anprallanlage im Labor wurde die Bruchschlagarbeit³ an zersetzten und unzersetzten Totholzstämmen und an Stammabschnitten von frisch gefällten, lebenden Fichten bestimmt. Schliesslich wurden im Feld mit Anpralltests Steinschlagtreffer an stehenden Bäumen in-situ simuliert und dabei die Energieabsorption der Bäume gemessen.

Umziehversuche

In den Sommermonaten 2003 bis 2005 wurden insgesamt 25 Bäume mit der von Fraser (1962) beschriebenen und von weiteren Autoren (Coutts 1986, Nielsen 1990, Brüchert et al 2000, Peltola et al 2000, Bolenikus 2001) angewendeten Methode umgezogen. Weitere 18 Bäume wurden im Rahmen von Vorversuchen für die Anpralltests im linear-elastischen Bereich zur Berechnung der Rotationssteifigkeit am Stammfuss um maximal 2° geneigt, um die Testbäume für die weiteren Tests nicht zu beschädigen (Wessolly 1991, Krasowski et al 1996). Alle Testbäume stammten aus durchforsteten oder undurchforsteten Beständen in der Landschaft Davos. Diese Testbestände stocken zwischen 1700 und 1800 m/M und lassen sich dem Standortstyp des Alpenlattich-Fichtenwaldes in den Ausführungen mit Heidelbeere (*Homogyno-Piceetum vaccinetosum myrtilli*) sowie mit Calamagrostis (*Homogyno-Piceetum calamagrostietosum villosae*) zuordnen. Die Untersuchungsgebiete sind zwischen 25° und 35° (ca. 45%–70%) steil und von östlicher oder westlicher Exposition. Die Spannweite der Durchmesser $d_{1.3}$ der Testbäume reichte von 13 cm bis 58 cm bei einem Mittelwert von 31 cm (Standardabweichung 11 cm). Nach den Tests konnten an den liegenden Bäumen Längen zwischen 9 m und 35 m gemessen werden. Die mittlere Baumlänge lag bei 24 m (Standardabweichung 6 m).

³ Bruchschlagarbeit ist der Widerstand des Holzes bei schlagartiger Beanspruchung, wie sie z.B. bei Werkzeugstielen auftritt. Dafür wird die Energie gemessen, die nötig ist, um eine Probe zu durchschlagen. Bezieht man diese benötigte Bruchschlagenergie auf den Prüfquerschnitt, erhält man eine Kenngrösse für die Schlagzähigkeit respektive die Sprödigkeit des Holzes (Sell 1997). Verschiedene Autoren bezeichnen diese Kenngrösse als Bruchschlagarbeit (Bosshard 1984).

Die Testbäume wurden auf einer Höhe von 20% relativ zur Baumhöhe mit einem Handseilzug langsam an- oder ganz umgezogen. Dabei wurden die Zugkraft $F(t)$ und die Stammneigungen auf den relativen Baumhöhen von 2%, 5% und 20% kontinuierlich mit einer Abtastrate von 5 Hz aufgezeichnet. Abbildung 1 zeigt die Versuchsanordnung. Ausgewertet wurden die Versuche nach der Methode von Jonsson et al (2006), bei der sich das Verankerungsmoment aus dem horizontalen Anteil F_h und dem vertikalen Anteil F_v der Zugkraft $F(t)$ sowie aus den Zusatzmomenten, die durch die Auslenkung $v(z)$ der Kronenmasse $m_k(z)$ und der Stammmasse $m_s(z)$ entstehen, zusammensetzt (siehe Formel 1).

$$M = F_h \cdot l_{Fh} + F_v \cdot l_{Fv} + \sum_{z=0}^{H_b} (m_s(z) \cdot v(z)) + \sum_{z=z_k}^{H_b} (m_k(z) \cdot v(z)) \quad (1)$$

Aus dem Verankerungsmoment M und der Stammfussrotation θ lässt sich nach Formel 2 die Rotationssteifigkeit des Wurzelwerks k berechnen.

$$k = \frac{M}{\theta} \quad (2)$$

Biegeversuche

Am Institut für Baustatik und Konstruktion (IBK) der ETH Zürich wurden, im Rahmen der Diplomarbeit Heiz (2001), Vierpunktbiegeversuche an frisch geschlagenen Baumstämmen durchgeführt.

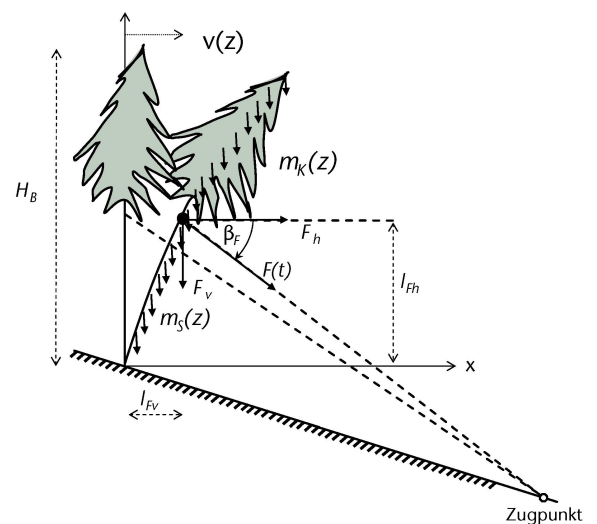


Abb 1 Umziehversuch. Überblick über die einzelnen Komponenten, die zum Verankerungsmoment am Stammfuss beitragen (Jonsson et al 2006): H_b = Baumhöhe [m], $m_s(z)$ = Stammmasse pro Meter in Höhe z [kg], $m_k(z)$ = Kronenmasse pro Meter in Höhe z [kg], $v(z)$ = Auslenkung des Stammes in Höhe z [m], $F(t)$ = Zugkraft [N], β_F = Zugwinkel, F_h = horizontale Kraftkomponente der Zugkraft [N], F_v = vertikale Kraftkomponente der Zugkraft [N], l_{Fh} = Abstand der horizontalen Kraftkomponente F_h vom Drehpunkt, l_{Fv} = Abstand der vertikalen Kraftkomponente F_v vom Drehpunkt.

Abb 2 Vier-Punkt-Biegeversuch am frischen Baumstamm.

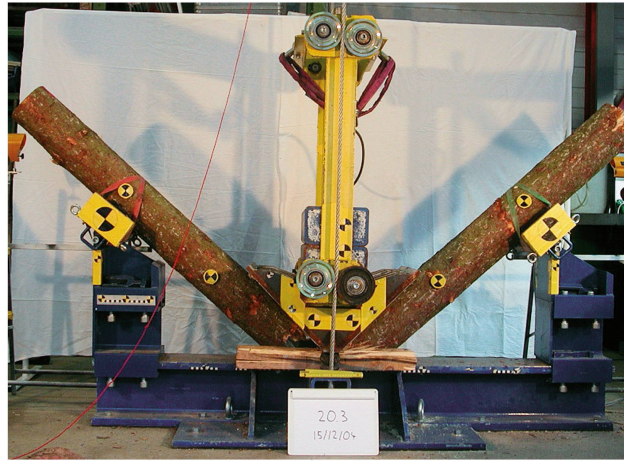
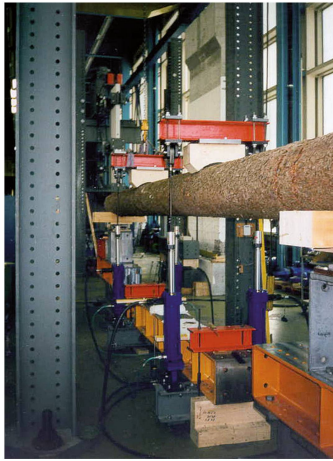


Abb 3 Bruchschlagarbeit. Anprallanlage zur Bestimmung der Bruchschlagarbeit an Stammabschnitten unmittelbar nach Beendigung eines Tests (Ammann 2006). Der 490 kg schwere Anprallwagen hat den 19 cm dicken Stamm durchschlagen.

Getestet wurden drei Fichten und vier Tannen mit Durchmessern auf 1.3 m Höhe ($d_{1.3}$) zwischen 38 cm und 41 cm und Baumlängen l_B zwischen 30 m und 35 m. Die Länge l_B der Probestücke wurde den Stammdurchmessern d angepasst und mass zwischen $15 \cdot d$ und $21 \cdot d$. Vom unteren Teil des Schaftes wurden je zwei Probestücke mit 7.2 m Länge getestet. Aus dem Kronenbereich wurden Probestücke mit einer Länge von 5.6 m verwendet. Die Kraft wurde in den Drittelpunkten ($\frac{1}{3} l$, $\frac{2}{3} l$) auf die Probestücke eingeleitet, welche an ihren Enden frei gelagert waren (siehe Abbildung 2).

Neben den Durchmessern und Längen der Probestücke wurden Wachstumsmerkmale wie Splint-, Kernholz-, Spätholzanteil und Jahrringbreiten aufgenommen. Weiter wurden Holzmasse und Holzfeuchtigkeit bestimmt. Bei den Versuchen wurden die Verläufe der Kraft und der Auslenkung in der Mitte der Probestücke aufgezeichnet. Die Biegefestigkeit wurde nach der Methode von Lundström et al (2007) berechnet, welche Scherverformungen und die Wirkung des Eigengewichtes mitberücksichtigt. Die Biegefestigkeit wurde für frisches Holz ohne Rinde berechnet.

Bestimmen der Bruchschlagarbeit

Die Bestimmung der Bruchschlagarbeit kennt man aus der Prüfung von Holz im Biegeschlagversuch an kleinen, fehlerfreien Proben (DIN 52189:1981). Die normierten Kleinproben haben eine Kantenlänge von 20 mm und eine Länge von 300 mm. Sie werden auf einem Pendelschlagwerk (engl.: «stroke pendulum») durchschlagen.

Bei den hier beschriebenen Tests wurden jedoch Stammabschnitte mit einer Länge von zirka 3 m und Durchmessern zwischen 13 cm und 51 cm mit einer neu entwickelten Anprallanlage durchschlagen. Auf der stationären Versuchsanlage wurden Stammabschnitte auf zwei Punkten gelagert, mit einem Fallgewicht durchschlagen und aus den Messwerten die Bruchschlagarbeit berechnet (Abbildung 3). Bei dieser Anlage konnte ein Anprallwagen

(max. Gewicht 492 kg) aus einer Höhe von maximal 2.8 m auf ein Rundholz fallen gelassen werden. Der Anprallwagen konnte eine maximale Anprallenergie von 13.5 kJ erreichen (Ammann 2006).

In den Jahren 2003 und 2004 wurden insgesamt 32 Stammabschnitte von Fichten getestet. Davon stammten 23 Stammabschnitte aus stehendem Totholz vom Gandberg bei Schwanden (Kanton Glarus). Diese Fichten waren vor rund 10 Jahren durch Borkenkäferbefall abgestorben und nicht genutzt worden. Bei 5 von diesen 23 Stammabschnitten wurde die Pilzart *Fomitopsis pinicola* (Rotrandiger Baumschwamm) als Verursacher ausgedehnter Kern- und Splintfäule (Fäulegrad des Stammquerschnittes $94.77 \pm 11.70\%$) in den Stämmen identifiziert. In den übrigen 18 Stammabschnitten aus Totholz wurde *Fomitopsis pinicola* nicht festgestellt (Fäulegrad des Stammquerschnittes $8.64 \pm 11.08\%$; Ammann 2006). Zum Vergleich wurde zusätzlich die Bruchschlagarbeit an neun Stammabschnitten von frisch gefällten, lebenden Fichten bestimmt. Diese Fichten von vergleichbarer Qualität sowie ähnlichem Jahrringverlauf wurden einem Gebirgswald in Reichenburg (Kanton Schwyz) entnommen. Alle getesteten Stammabschnitte stammten aus dem unteren Stammbereich und wiesen wenige Äste auf.

Die Versuche wurden mit zwei verschiedenen Methoden ausgewertet. Bei der Methode A wurden die Messwerte eines im Anprallwagen eingebauten Beschleunigungssensors (Abtastrate 1000 Hz) verwendet. Durch die Integration der Beschleunigungswerte konnten die Geschwindigkeit und der zurückgelegte Weg des Anprallwagens berechnet werden. Somit konnte die kinetische und die potenzielle Energie des Anprallwagens zu jedem beliebigen Zeitpunkt berechnet werden. Die Differenz der Energien

vor dem Anprall und nach Bruch des Stammabschnittes ergab die Bruchschlagenergie W , die zum Durchschlagen des Stammabschnittes erforderlich war. Bezieht man die gemessene Energiedifferenz auf den Anfangsquerschnitt des Stammabschnittes A erhält man den Wert zur Bruchschlagarbeit w , (DIN 52189:1981).

$$w = W / A \quad (3)$$

Der Zeitpunkt des Anpralls und des Bruchs war aus der Messdatenreihe klar ersichtlich, da der Anprallwagen beim Aufprall auf den Stamm stark abgebremst wurde und die Beschleunigungswerte abrupt stark ins Negative drehten. War das Holz vollständig durchgeschlagen, beschleunigte der Anprallwagen wieder, d. h. die Beschleunigungswerte wurden wieder positiv.

Für die Auswertungsmethode B wurde der Aufprallprozess mit einem Hochgeschwindigkeits-Videosystem (250 Bilder pro Sekunde) festgehalten. Die Videoaufnahmen wurden mit der Software WINanalyze 3D, welche eine dreidimensionale Bewegungsanalyse erlaubt, untersucht. Schwarz/gelbe Messpunkte am Aufprallwagen wurden als zu verfolgende Objekte markiert. Spielte man die Videosequenz ab, so verfolgte die Software WINanalyze 3D dieses Objekt und erfasste dessen Höhe in Abhängigkeit der Zeit (die Kamera macht alle 0.004 Sekunden ein Bild). Einerseits wurde die Analyse mit einem Höhen/Zeit-Diagramm grafisch dargestellt, andererseits wurden die Daten für weitere Auswertungen in Tabellenform abgespeichert. So liess sich die Höhenposition des Wagens zu jedem Zeitpunkt des Anprallprozesses bestimmen. Mit dem zurückgelegten Weg und der dazugehörigen Zeit liess sich die Geschwindigkeit des Wagens zwischen zwei Bildern berechnen (Gieck 1995). Die durch den Stammabschnitt aufgenommene Energie wurde unter Anwendung des Energieerhaltungssatzes⁴ berechnet. Dabei wurde die mechanische Energie des Anprallwagens zum Zeitpunkt des Aufpralles des Wagens auf den Stamm (t_1) und nach dem Durchschlagen des Stammes (t_2) berechnet, d. h. bei Beginn des Bruchprozesses und nach Abschluss des Bruchprozesses.

⁴ Erhaltung der Energie: In einem abgeschlossenen System bleibt der Energieinhalt konstant. Energie kann weder vernichtet werden noch aus nichts entstehen; sie kann sich in verschiedene Formen umwandeln oder zwischen verschiedenen Teilen des Systems ausgetauscht werden. Durch die Zufuhr oder Abgabe von Arbeit wird die Energie eines Körpers oder die Gesamtenergie eines Systems materieller Punkte erhöht oder erniedrigt (Hering et al 1997).



Abb 4 Anprallversuch. Auf den zwei Führungsseilen frei fahrender Anprallwagen unmittelbar nach dem Test. Der 517 kg schwere Anprallwagen prallte mit einer Geschwindigkeit von 21,4 m/s auf den Testbaum mit einem Durchmesser $d_{1.3} = 43$ cm. Die Energie von 118 kJ reichte aus, um den Baum zu brechen. Dank dieses realitätsnahen dynamischen Tests kann das Energieabsorptionsvermögen von Bäumen bei Steinschlag berechnet werden.

Anprallversuche

Zur Quantifizierung und Analyse des maximalen Energieabsorptionsvermögens von Einzelbäumen wurden insgesamt 15 Fichten mit der neu entwickelten Methode des Anpralltests geprüft. Die mobile Anprallinstallation besteht aus einer seilbahnähnlichen Tragkonstruktion und einem freilaufenden Anprallwagen (Abbildung 4). Die Tragkonstruktion wurde so in der Falllinie installiert, dass der gewünschte Testbaum zwischen beiden Tragseilen stand. Die Auswahl der geeigneten Testflächen und Versuchsbäume war schwierig, da genügend starke Bäume ($d_{1.3} > 30$ cm) für die Abspannung der Tragkonstruktion in einem bestimmten räumlichen Muster möglichst nahe an einer Forststrasse gefunden werden mussten. Zusätzlich musste der Testbestand genügend steil sein und eine konkave Geländeform aufweisen, damit der Anprallwagen auf der Fahrt zum Anprall genügend Bodenfreiheit besitzt und ausreichend Geschwindigkeit aufnehmen kann. Die Anprallenergie konnte durch Verkürzung der Anlaufstrecke (max. 50 m) und durch Variation des Anprallgewichtes zwischen 192 kg und 992 kg dem Durchmesser des jeweiligen Testbaumes angepasst werden. Die Testbäume wurden mit Geschwindigkeiten zwischen 12 m/s und 23 m/s angeprallt. Daraus resultierten Anprallenergien zwischen 40 und 160 kJ. Die Testbäume wurden auf Höhen zwischen 0.7 m und 1.85 m (Mittel: 1.17 m \pm 0.35) angeprallt.

Um das Energieabsorptionsvermögen eines Baumes zu analysieren, ist es notwendig, die Ortsfunktion des Wagens und des Baumes beim Anprall zu kennen. Der Anprall, das Beschleunigen des Baumes, die Dehnung des Stammes, die Translation und die Rotation des Wurzelwerks bis zum Stoppen des Anprallwagens laufen innerhalb von Bruchteilen einer Sekunde ab (ca. 40 ms). Aus diesem Grund wurden zur Datenaufzeichnung Beschleunigungssen-

soren (10 kHz) sowie Hochgeschwindigkeits-Videokameras (250 Hz) mit sehr hoher zeitlicher Auflösung verwendet.

Die Analyse der Anprallversuche basierte auf den Auswertungen der Videobilder mit der Software WINalyze 3D und der Integration der Beschleunigungsgeberwerte. Bei der Berechnung wurden folgende Teilprozesse mit berücksichtigt:

- lokale Stammdeformation durch Anprall,
- Stammbiegung,
- Bewegungen des Wurzelbodenbereichs (Rotation und Translation),
- Trägheit des Systems,
- Energieverluste durch Reibung.

Für die Berechnung der Energieabsorption bei den Anprallversuchen wurde die Methode nach Lundström et al⁵ verwendet. Da erwartet werden kann, dass die maximalen Absorptionsenergien eines Baumes neben dem Baumdurchmesser auch von der Trefferhöhe abhängig sind, wurden die Werte der maximalen Energieabsorption auf eine Trefferhöhe von 1.3 m normiert, um die einzelnen Ergebnisse miteinander vergleichen und in Relation zum Durchmesser setzen zu können. Da die Trefferhöhen in einem engen Bereich (0.7–1.85 m) lagen, wurden die Werte der Energieabsorption mit einem linearen Verfahren normiert.

Ergebnisse

Umziehversuche

Die Analyse der Verankerungseigenschaften zeigte, dass bei grösseren Bäumen ($d_{1.3} > 20$ cm) das maximale Verankerungsmoment M_{\max} eher schon bei einer geringeren Stammfussrotation θ erreicht ist als bei kleineren Bäumen. Im Mittel war M_{\max} bei einem θ von $11^\circ (\pm 7^\circ)$ erreicht. Weiter konnte festgestellt werden, dass die Rotationssteifigkeit $k_{0.5}$ bei einer Stammfussrotation von 0.5° in enger Beziehung mit M_{\max} steht ($M_{\max} = 0.0325 \cdot k_{0.5}$, $R^2 = 0.88$).

Die Verankerungseigenschaften $k_{0.5}$ und M_{\max} korrelieren am besten mit dem Baumgewicht, welches wiederum in sehr enger Beziehung mit dem Stammvolumen V oder anderen Bauparametern wie der dritten Potenz des Brusthöhendurchmessers steht. In Abbildung 5 ist die Beziehung des Stammvolumens V mit M_{\max} und $k_{0.5}$ dargestellt. Auffällig ist, dass die Rotationssteifigkeiten $k_{0.5}$ der kleineren Volumina ($< 0.6 \text{ m}^3$) alle unterhalb der Ausgleichsgerade liegen. Das weist auf die enorme Elastizität von jungen Bäumen mit geringen Volumina hin.

Biegeversuche

Bei der Analyse der Vierpunktbiegeversuche konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Baumarten Fichte und Tanne gefunden werden. Die Tanne zeigte jedoch tendenziell die höheren Werte für die Biegefestigkeit als die Fichte. Der Mittelwert für die Tanne ist mit $50.6 \text{ MPa} (\pm 5.1)$ nur minim grösser als der Mittelwert für die Fichte ($49.1 \text{ MPa} (\pm 4.7)$).

In Abbildung 6 ist ersichtlich, dass die Biegefestigkeit entlang der Stammachse nicht konstant ist. Die unteren Stammabschnitte besitzen die höhere Biegefestigkeit als die Abschnitte von höher gelegenen Baumteilen. Die Werte für die Biegefestigkeit schwanken aufgrund der sich mit der Baumhöhe ändern

5 Lundström T, Jonsson M, Simon H A method to assess reaction and energy absorption of trees exposed to rockfall. Plant Soil, submitted.

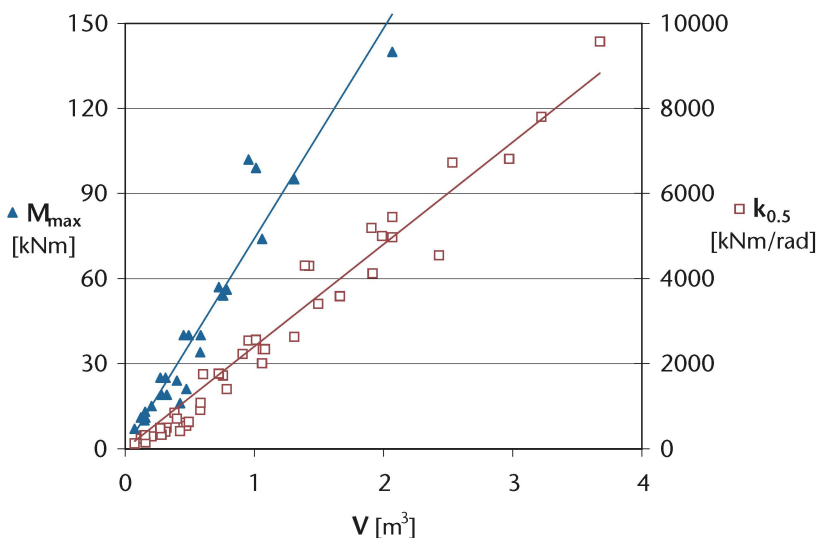


Abb 5 Verankerungseigenschaften. Maximales Verankerungsmoment M_{\max} ▲ und Rotationssteifigkeit $k_{0.5}$ □ in Abhängigkeit des Stammvolumens V : $M_{\max} = 74.112 \cdot V$ ($R^2 = 0.9175$), $k_{0.5} = 2402.2 \cdot V$ ($R^2 = 0.9628$).

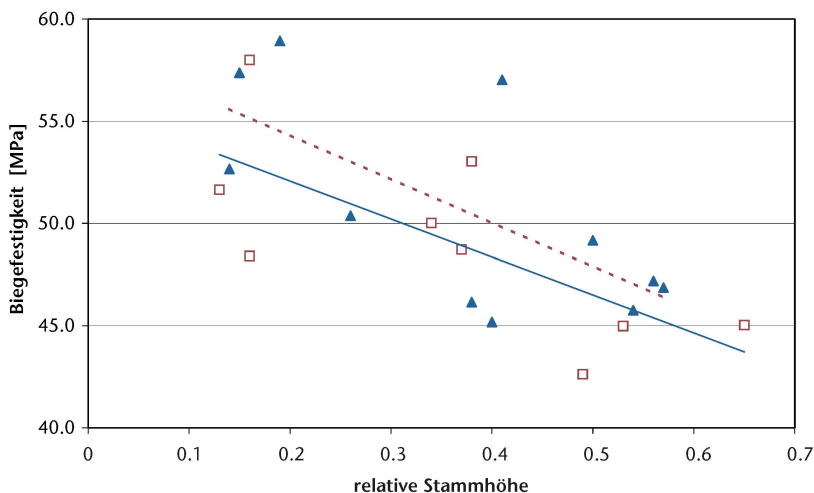


Abb 6 Biegefestigkeit. Resultate der Vier-Punkt-Biegeversuche an frisch geschlagenem Rundholz in Abhängigkeit der relativen Stammhöhe (Entnahmehöhe des Probenstücks relativ zur Stammhöhe) für Fichte ▲ und Tanne □. Die Regression für die Tanne (gestrichelte Linie; $-21.446 \cdot p_1 + 58.599$ ($R^2 = 0.4757$)) liegt wenig höher als diejenige der Fichte (durchgezogene Linie; $-18.555 \cdot p_1 + 55.776$ ($R^2 = 0.5102$)). Der Unterschied ist jedoch nicht signifikant.

dernden Holzeigenschaften (Rohdichteunterschiede im Stamm, Astigkeit, vgl. Niemz 2005) zwischen 45.2 MPa und 58.9 MPa bei der Tanne beziehungsweise zwischen 42.6 und 58.0 MPa bei der Fichte.

Bruchschlagarbeit

Die Auswertungen der Bruchschlagarbeits-tests mit den zwei verschiedenen Methoden A (Beschleunigungsgeberwerte) und B (Videoanalyse) haben ergeben, dass die Auswertungsmethode nur einen kleinen Einfluss auf die Ergebnisse besitzt. Die Ergebnisse der Methode A liegen im Mittel jedoch 6.5 kJ/m² tiefer als die Werte der Methode B. Dieser Unterschied ist nach dem Wilcoxon-Test für Paardifferenzen zwar hochsignifikant, jedoch mit einer

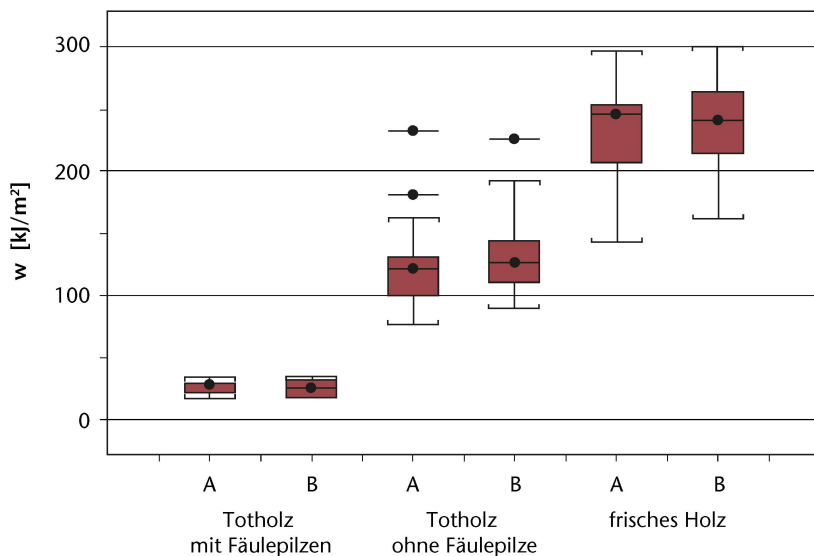


Abb 7 Bruchschlagarbeit. Bruchschlagenergie pro Querschnittsfläche ausgewertet mit zwei verschiedenen Methoden (Methode A: Integration der Beschleunigungsgeberwerte; Methode B: Videoanalyse). Getestet wurden drei verschiedene Holzzustände: Totholz mit Fäulepilzen, Totholz ohne Fäulepilze und frisches Holz. Die drei Punkte im Holzzustand «Totholz ohne Fäulepilze» liegen ausserhalb des Standard-span und sind als extreme Beobachtungen zu betrachten.

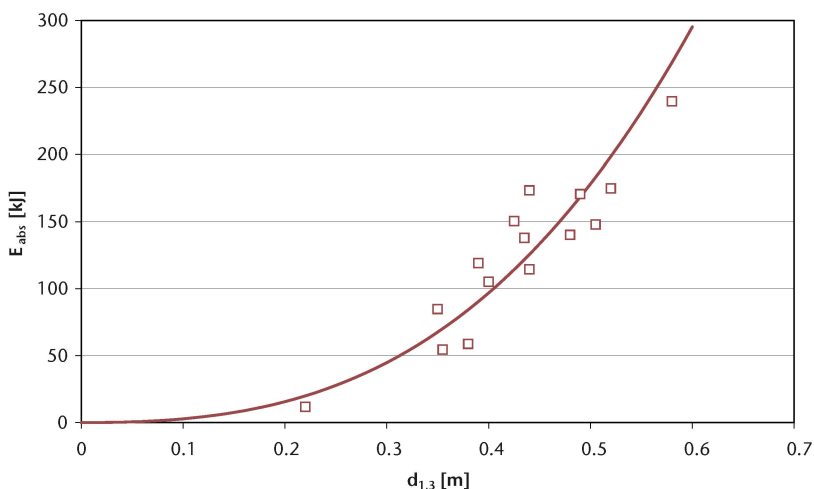


Abb 8 Energieabsorption von Bäumen bei Steinschlag. Maximale Energieabsorption in 1.3 m Höhe $E_{abs1.3}$ □ in Abhängigkeit vom Durchmesser $d_{1.3}$. $E_{abs1.3}=1495.2*d_{1.3}^{3.0335}$ ($R^2=0.8968$) [kJ].

Abweichung von weniger als 5% sehr gering. In Abbildung 7 ist der Einfluss der Holzeigenschaften klar ersichtlich. Die Mittelwerte für Totholz, das kaum durch Fäulepilze beeinträchtigt wurde, lagen mit der Methode A berechnet bei 124.1 ± 38.3 kJ/m² beziehungsweise mit Methode B bei 131.9 ± 34.5 kJ/m² etwa fünffach über denjenigen Werten des Totholzes, das bereits stark durch Fäulepilze zersetzt war (A: 25.5 ± 6.6 kJ/m²; B: 25.6 ± 7.7 kJ/m²). Stammabschnitte von frisch gefällten, lebenden Fichten wiesen Bruchschlagarbeitswerte von 231.4 ± 45.3 kJ/m² bei Methode A, respektive 239.1 ± 40.8 kJ/m² bei Methode B auf.

Anprallversuche

Wie schon in Foetzki et al (2004) beschrieben, konnte bei der Analyse der Anprallversuche festgestellt werden, dass auch beim Steinschlagprozess, abhängig vom Baumdurchmesser, Energie und Treffpunkt des Steines bis zirka 50% der Energie durch Translation und Rotation des Wurzelsystems unterirdisch absorbiert werden. Die restliche Energie wird durch Stammbiegung und durch die lokale Stammpenetration, der Verformung des Holzkörpers beim Aufprall (eigentlicher Schaden), abgebaut. Dabei werden zirka $\frac{4}{5}$ der Absorptionsenergie durch Verformung und ca. $\frac{1}{5}$ durch die Trägheit eines Baumes bestimmt (Foetzki et al 2004).

Die Analyse der Energieabsorption normiert auf eine Trefferhöhe von 1.3m ergab, dass die Energieabsorption $E_{abs1.3}$ mit der dritten Potenz des Baumdurchmessers $d_{1.3}$ zunimmt (Abbildung 8). Es konnte folgende Regression gefunden werden: $E_{abs1.3}=1495.2*d_{1.3}^{3.0335}$ ($R^2=0.90$) [kJ/m²].

Diskussion

Für Nielsen (1990) liefern Umziehversuche gute Ergebnisse, um die Verankerungsstärke in Relation mit anderen Baumparametern zu analysieren. Jedoch weist er darauf hin, dass die Verwendung der absoluten Verankerungsmomente, zum Beispiel für die Berechnung von kritischen Windgeschwindigkeiten, heikel ist, da quasi-statisch ermittelte Werte auf dynamische Prozesse angewendet werden und somit ein systematischer Fehler begangen wird. Er schätzt, dass Bäume unter dynamischer Einwirkung vielfach höheren Belastungen standhalten als bei statischer Belastung. Bestimmt man aus den Kraft-Weg-Diagrammen der Biegeversuche die Bruchenergie und aus dem Verlauf der Verankerungsmomente mit der Methode nach Stokes et al (2005) den Energiebedarf zur Rotation des Wurzelsystems, können die statischen Tests (Biege- und Umziehversuche) mit den dynamischen Versuchen (Bruchschlagarbeits-tests und Anprallversuche) verglichen werden (Abbildung 9).

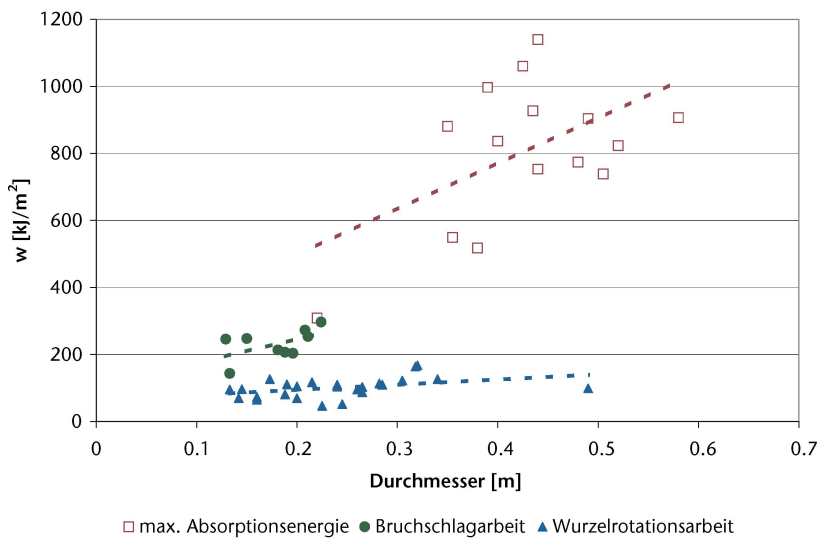


Abb 9 Vergleich der Energien pro Querschnittsfläche aus den unterschiedlichen Tests. Die Energiewerte für die maximale Energieabsorption pro Grundfläche für Treffer in Höhe 1.3 m sind rund doppelt so hoch wie die Bruchschlagarbeitswerte für frisches grünes Holz. Die Energie von frischen Baumstämmen, berechnet aus den statischen Biegeversuchen, ist etwas niedriger als die Werte für die Bruchschlagarbeit. Die Energien, die zur Rotation der Wurzelwerke bei den statischen Umziehversuchen benötigt wurden, betragen zirka 15% der Energieabsorption der Anprallversuche, bei denen man einen Anteil von mindestens 30% der Rotation des Wurzelwerks zuschreiben musste. Aus diesem Vergleich der Energien pro Querschnittsfläche sieht man, dass statisch ermittelte Energiewerte um einiges niedriger sind als Werte aus dynamischen Versuchen.

Aus den Analysen der Anprallversuche ging hervor, dass mindestens 30% der Absorptionsenergie durch die Rotation des Wurzelwerks aufgenommen werden. Vergleicht man die Absorptionsenergien der Anprallversuche mit den aus den Umziehversuchen berechneten Energien für eine Wurzelrotation von 10° (bei den Anprallversuchen wurden keine grösseren Stammfussrotationen registriert), stellt man fest, dass die statisch ermittelte Energie aus den Umziehversuchen 15% anstatt mindestens 30% der Absorptionsenergie beträgt. Betrachtet man die Bruchenergie, ermittelt aus den Kraft-Weg-Diagrammen der Biegeversuche, stellt man ebenfalls fest, dass die dynamisch ermittelten Werte um den Faktor 1.4 höher sind. Die Werte für die Bruchschlagarbeit scheinen im Vergleich mit den Absorptionsenergien realistisch. Wie bei den Anprallversuchen ermittelt, macht der Anteil der Energieabsorption im Stamm ca. 50% der gesamten Energie aus, die beim Steinschlag vernichtet wird. Die Feststellung von Nielsen (1990), dass mit statischen Verfahren ermittelte Stabilitätskennwerte nicht ohne weiteres für dynamische Prozesse übernommen werden können, kann somit bestätigt werden.

Weiter können Kennwerte von Holzproben nicht auf ganze Bäume übertragen werden. Vergleicht man die Biegefestigkeit (49 MPa) und die Bruchschlagarbeit (239 kJ/m^2) von frischen Fichtenstämmen mit den Angaben für genormte Holzproben aus der Literatur (Biegefestigkeit 65–75 MPa,

Bruchschlagarbeit $40\text{--}50 \text{ kJ/m}^2$ (Sell 1997)) stellt man fest, dass die Biegefestigkeit der trockenen Holzproben grösser ist als für die frischen Stammabschnitte (Faktor 1.4). Bei der Bruchschlagarbeit verhielten sich die Baumstämme um den Faktor 5 zäher als die genormten Kleinproben. Dies zeigt, dass die bekannten mechanischen Holzeigenschaften, die anhand von Holzproben für trockenes Bauholz ermittelt wurden, nicht auf frische Baumstämme oder auf stehende Bäume übertragen werden können.

Um vertrauenswürdige Daten für die Berechnung von dynamischen Prozessen an Bäumen zu gewinnen, müssen folglich möglichst realitätsnahe Versuche durchgeführt werden. Um die Anzahl dieser aufwändigen Versuche zu begrenzen, ist eine Implementierung der Feldversuche in Computermodelle angebracht (Abbildung 10). Dank des Einbezugs der verschiedenen Versuche konnte ein realitätsnahes Baummodell auf Basis der Finite-Element-Methode parametrisiert und kalibriert werden. Mit diesem Modell können weiterführende Analysen zur Energieabsorption durch Bäume bei Steinschlag durchgeführt werden. So kann die ursprüngliche Keilform bei den Feldversuchen durch eine beliebige Steinform ersetzt werden. Weiter können die Einflüsse der Gesteinsmasse und -energie, der Höhe, Zentralität und Winkel des Anpralls sowie der Baumeigenschaften auf den Prozess der Energieabsorption studiert werden. Bei den Baumeigenschaften spielen neben dem Baumdurchmesser vor allem die Materialeigenschaften sowie Stamm- und Wurzelfäulen eine zentrale Rolle.

Die von Dorren et al (2005) und Dorren & Berger (2006) veröffentlichten Werte der maximalen Energieabsorption, ermittelt durch Videoanalysen von Baumtreffern, liegen wesentlich höher (Faktor 2) als die Werte der Anprallversuche. Dank der Analysen mit dem FEM-Baummodell konnte dieser Unterschied jedoch erklärt werden (Kalberer 2006). Einerseits wirkt sich die Keilform des Anprallwagens reduzierend auf die Energieabsorption der Bäume aus und andererseits liegt es an unterschiedlichen Definitionen der Energieabsorption. Im Gegensatz zur Auslegung von Dorren et al (2005) und Dorren & Berger (2006; Punkt C in Abbildung 10) wird in dieser Arbeit unter dem maximalen Energieabsorptionsvermögen von Bäumen bei Steinschlag die Grenzenergie für Stammbruch verstanden (zwischen Punkt A und B in Abbildung 10). Sind die Gesteinsenergien kleiner als das maximale Energieabsorptionsvermögen der Bäume, können Steine durch Baumkontakt gestoppt werden, ohne dass es zu Stammbrüchen kommt. Besitzen Steine grössere Energien können Bäume nach Eintreten des Stammbruches noch weiter Energie absorbieren (Wurzelrotation, Wurzelbrüche, Reibung, etc.). Diese zusätzliche Energieabsorption wird von Dorren et al (2005) und Dorren & Berger (2006) mit einbezogen.

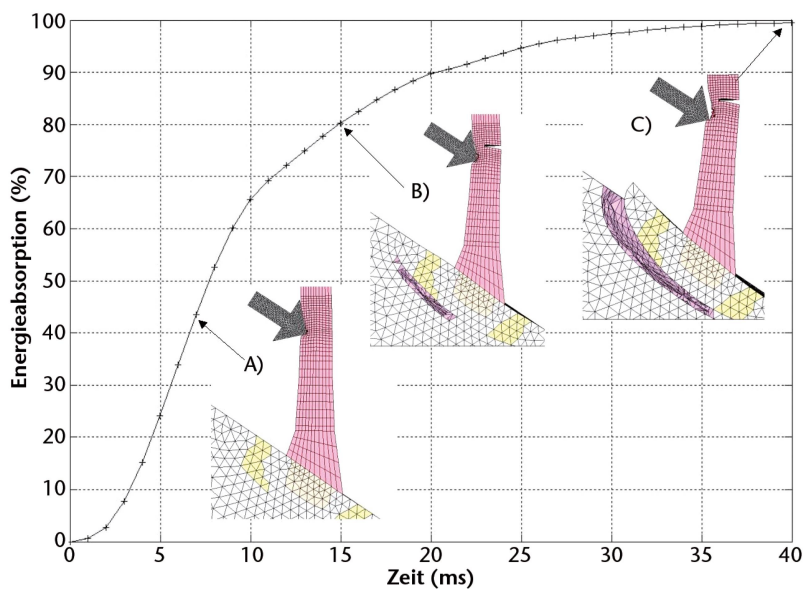


Abb 10 Energieabsorptionsprozess eines Testbaumes während eines Anprallversuches. A) Nach 7 ms sind noch keine Schäden an Wurzeln und Stamm (ausser Anprallwunde) entstanden. Der Baum hat bereits über 40% der maximalen Energie absorbiert. B) Nach 15 ms sind Teile des Wurzelsystems beschädigt und der Stamm gebrochen. Vernichtet wurden jedoch erst 80% der maximalen Energie. C) Nach 40 ms ist die Interaktion Keil-Baum sowie der Energieabsorptionsprozess abgeschlossen. Der Baum wurde entwurzelt und der Stamm ist gebrochen. Bis der Baum jedoch ganz zu Fall kommt, dauert es noch einige Sekunden! Je nach Definition der Energieabsorption (A–C) und je nachdem, ob Schäden an den Bäumen in Kauf genommen werden oder nicht, unterscheidet sich das Energieabsorptionsvermögen von Bäumen und Wäldern erheblich (Kalberer 2006).

Mit ausgeklügelten Experimenten an Bäumen und Baumteilen und mit Hilfe von Modellierungen konnten die mechanischen Eigenschaften der Fichte getestet und beschrieben werden. Die lebenden Bäume zeigten in Bezug auf ihre mechanischen Eigenschaften wesentliche Unterschiede gegenüber eingeschnittenem und getrocknetem Holz. Für die Analyse der Interaktionen von Bäumen mit Naturgefahren konnten somit für die Baumart Fichte wichtige Grundlagen erarbeitet werden. Mit den entwickelten Methoden können zukünftig die mechanischen Eigenschaften weiterer Baumarten getestet werden. ■

Literatur

- AMMANN M (2006) Schutzwirkung abgestorbener Bäume gegen Naturgefahren. Zürich: Eidg Techn Hochschule, PhD Thesis. 188 p.
- ANDERSSON SO (1980) Volume increment and stand safety in different types of thinning. *Schr Forstl Fak Univ Göttingen* 67: 260–268.
- BERGER F, QUETEL C, DORREN LKA (2002) Forest: a natural protection mean against rockfalls, but with which efficiency? The objectives and methodology of the rockfor project. In: *Proc Interpraevent, Pacific Rim, Matsumoto (Japan)*. pp. 815–826.

- BOLENIKUS D (2001) Zur Wurzelbildung von Fichte (*Picea abies* L. [Karst]) und Weisstanne (*Abies alba* Mill.) in gleich- und ungleichaltrigen Beständen. *Freiburg iBr: Forstwissenschaftl Fakultät Univ Freiburg, Ber Freiburger Forstl Forsch* 35. 155 p.
- BOSSHARD HH (1984) *Holzkunde*. Basel: Birkhäuser, 3 vol.
- BRÄNDLI UB (1999) Zustand der Schutzwälder: Im Moment noch gut, aber. *Wald Holz* 80 (5): 11–14.
- BRANG P ET AL (2004) Schutzwaldodynamik unter Störungen und Eingriffen: Auf dem Weg zu einer systematischen Sicht. *Birmensdorf: Eidgenöss Forsch.anst Wald Schnee Landsch, Forum für Wissen*. pp. 55–66.
- 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.
- BUWAL (2002) *Umwelt Schweiz 2002*. Bern: Bundesamt Umwelt Wald Landschaft, 2 vol.
- CAMERON AD (2002) Importance of early selective thinning in the development of long-term stand stability and improved log quality: a review. *Forestry* 75 (1): 25–35.
- CHROUST L (1980) Erziehung von Fichtenbeständen in von Schnee und Wind gefährdeten Lagen. *Schr Forstl Fak Univ Göttingen* 67: 206–213.
- COUTTS MP (1983) Root architecture and tree stability. *Plant Soil* 71 (1–3): 171–188.
- COUTTS MP (1986) Components of tree stability in Sitka spruce on peaty gley soil. *Forestry Commission Bulletin* 59: 173–197.
- DORREN LKA, BERGER F, MÉTRAL R (2005) Schutzwald gegen Steinschlag. *Wald Holz* 86 (11): 2–4.
- DORREN LKA, BERGER F (2006) Stem breakage of trees and energy dissipation at rockfall impacts. *Tree Physiol* 26: 63–71.
- FOETZKI A ET AL (2004) Die mechanische Stabilität von Bäumen: das Projekt Baumstabilität des FB Naturgefahren. *Birmensdorf: Eidgenöss Forsch.anst Wald Schnee Landsch, Forum für Wissen*. pp. 35–42.
- FRASER AI (1962) The soil and roots as factors in tree stability. *Forestry Commission Bulletin* 35: 117–127.
- FREDERICKSEN TS, HEDDEN RL, WILLIAMS SA (1993) Testing loblolly pine wind firmness with simulated wind stress. *Can J For Res* 23: 1760–1765.
- GIECK K (1995) *Technische Formelsammlung*. Germering: Gieck, 30 ed.
- HEIZ U (2001) Mechanische Stabilität ausgewählter Baumarten unter quasi-statischer Windeinwirkung. Zürich: Forstwissenschaften Eidg Techn Hochschule, Diplomarbeiten. 82 p.
- HERING E, MARTIN R, STÖHRER M (1997) *Physik für Ingenieure*. Berlin: Springer, 3 ed. 744 p.
- JAHN J (1988) Entwaldung und Steinschlag. In: *Proc Interpraevent, Graz, vol 1*. pp. 185–198.
- JOHANN K (1981) Nicht Schnee sondern falsche Bestandeshaltung verursacht Katastrophen. *Allg Forstztg (Wien)* 92: 163–171.
- JONSSON M, FOETZKI A, KALBERER M, AMMANN W, STÖCKLI V (2006) Root-soil rotation stiffness of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst) growing on subalpine forested slopes. *Plant Soil* 285: 267–277.
- KALBERER M (2006) Die mechanische Stabilität von Bäumen. *Fachleute Naturgefahren Schweiz Agenda* 1/2006: 13–16.
- KRASOWSKI MJ, HAWKINS CDB, COATES H, OTT PK (1996) Static test of lodgepole pine stability in the central interior of British Columbia. *Can J For Res* 26: 1463–1472.

- LE HIR C, BERGER F, DORREN LKA, QUETEL C (2004) Forest: a natural means of protection against rockfall, but how to reach sustainable mitigation? Proc Interpraevent, Riva (Trient), vol 5. pp. 59–69.
- LEIBUNDGUTH (1986) Unsere Gebirgswälder: Natur – Zustand – Bewirtschaftung. Bern: Haupt. 84 p.
- LUNDSTRÖM T, HEIZ U, STÖCKLI V (2007) Fresh-wood bending: linking the mechanical and growth properties of a Norway spruce stem. Tree Physiol, in press.
- NIELSEN CCN (1990) Einflüsse von Pflanzenabstand und Stammzahlhaltung auf Wurzelform, Wurzelbiomasse, Verankerung sowie auf die Biomassenverteilung im Hinblick auf die Sturmfestigkeit der Fichte. Frankfurt aM: Sauerländer. 279 p.
- NIEMZ P (2006) Holzphysik. Zürich: Inst Baustoffe Eidg Techn Hochschule, Vorlesungsskript. <http://e-collection.ethbib.ethz.ch/show?type=lehr&nr=130> (3 Apr 2007).
- PELTOLA H, KELLOMÄKI 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.
- SELL J (1997) Eigenschaften und Kenngrößen von Holzarten. Dietikon: Baufachverlag. 87 p.
- SLODICK M (1995) Thinning regim in stands of Norway spruce subjected to snow and wind damage. In: Coutts M, Grace J, editors. Wind and Trees. Cambridge: Cambridge Univ Press. pp. 436–447.
- STOKES A ET AL (2005) Mechanical resistance of different tree species to rockfall in the French Alps. Plant Soil 278: 107–117.
- WESSOLLY L (1991) Verfahren zur Bestimmung der Stand- und Bruchsicherheit von Bäumen. Holz als Roh- und Werkstoff 49: 99–104.
- WILSON JS, OLIVER CD (2000) Stability and density management in Douglas-fir plantations. Can J For Res 30: 910–920.

Mechanische Eigenschaften der Fichte: Experimente zur Analyse von Naturgefahren

Die Schutzwirkung von Wäldern wird unter anderem durch die mechanische Stabilität der Bäume gegenüber Naturereignissen bestimmt. Trotz dieser grossen Bedeutung sind die quantitativen Grundlagen über die mechanischen Wechselwirkungen zwischen Bäumen, Wald und Naturgefahrenprozessen nur lückenhaft bekannt. Mit Experimenten an Bäumen und Baumstämmen sowie der Modellierung von Bäumen wurden die mechanischen Eigenschaften der Fichte und deren Energieabsorptionsvermögen bei Steinschlag ermittelt. Es zeigte sich, dass die Verankerungseigenschaften in engem Zusammenhang zum Stammvolumen stehen. Mit Vier-Punkt-Biegeversuchen und Bruchschlagarbeitstests wurde die Festigkeit von Baumstämmen ermittelt. Diese wird stark durch den Holzzustand beeinflusst und weicht zum Teil stark von den bekannten Holzkennwerten für eingesägtes und getrocknetes Bauholz ab. Das Verhalten von Bäumen bei Steinschlagereignissen konnte mit Anprallversuchen simuliert und das Energieabsorptionsvermögen der Fichte ermittelt werden. Diese Experimente lieferten wichtige Grundlagen zur Analyse der Interaktionen zwischen Naturgefahren und Bäumen respektive Wäldern für die Baumart Fichte. Um die Wirkung der Schutzwälder gegenüber Naturgefahren zu quantifizieren, sind jedoch weitere, realitätsnahe Experimente mit anderen Baumarten nötig.

Propriétés mécaniques de l'épicéa: Essais pour l'analyse des dangers naturels

Cet article présente les divers tests qui ont été entrepris afin de mettre en évidence les propriétés mécaniques des arbres. La capacité d'ancrage des arbres a été analysée en utilisant des tests de traction. Les premiers résultats ont montré que la résistance au déracinement était liée étroitement au volume sur pied du tronc. Des essais réalisés en utilisant 4 points de flexion et 3 points de rupture ont servi à déterminer la résistance des troncs. Les valeurs de résistance déduites de ces tests dépendent fortement de l'état du bois et il a été démontré qu'elles s'écartent de manière importante des valeurs connues proposées pour le bois de construction (coupé et sec). Le comportement des arbres lors d'impacts suite à des chutes de pierres a pu être simulé grâce à la mise en place d'essais qui ont permis de déterminer la quantité d'énergie absorbée par les épicéas. Ces expérimentations constituent une base solide dans l'analyse des interactions entre le phénomène de chutes de pierres et les massifs forestiers composés d'épicéas. Pour estimer plus précisément l'influence des forêts de protection par rapport aux dangers naturels que représentent les chutes de pierres, des essais sur d'autres essences devraient être entrepris.