

Auswirkungen historischer und aktueller anthropogener Belastungen auf das Wurzelsystem der Gewöhnlichen Fichte (*Picea abies*) in Wäldern des Gleinalpen-Gebietes

Peter TRINKAUS, Herwig PROSKE & Volker STRASSER

Zusammenfassung: Die abweichende Wurzeltracht bei der Gewöhnlichen Fichte (*Picea abies*) im Gleinalpen-Gebiet von der Norm ist eine der Ursachen für Hangrutschungen in diesem Gebiet. Die Gewöhnliche Fichte wurzelt hier auffallend flach und bildet auch im fortgeschrittenen Alter keine oder nur sehr dünne vertikal verlaufende Wurzeln. Jahrhunderte zurückliegende anthropogene Eingriffe, wie Kahlschlagwirtschaft, Schlagbrennen, Getreideanbau und anschließende Beweidung, die auch heute noch im Bodenchemismus nachwirken, wurden als die Hauptursachen für dieses untypische Verhalten der Fichte identifiziert.

Summary: Effects of historical and actual anthropological impacts on the root system of Norway spruce (*Picea abies*) of forests in the Gleinalpe region. – The abnormality of the root systems of spruces in the Gleinalpe region is one of the causes for landsliding in this area. The spruces root remarkable flat and form even in advanced ages none or merely very thin vertical extending roots. Anthropological operations over the past centuries, like clear-cutting, burning down of cut-over areas, grain cultivation and the following livestock grazing, which still affect soil chemistry, can be identified as the chief causes for this particularity.

Key words: root system, soil chemistry, historical and actual anthropological impacts, landsliding.

Einleitung

In einem Zeitraum von 3 Jahren wurden in einem Teilbereich des Gleintales östlich von Knittelfeld (Steiermark) geo- und biowissenschaftliche Erhebungen durchgeführt, die

einen Beitrag zur Klärung des Problemkreises Erosion und Massenbewegungen unter den spezifischen geologischen und klimatologischen Verhältnissen dieses Raumes liefern. Zusätzlich erfolgte im Untersuchungsgebiet eine Vielzahl an Untersuchungen, die sich mit dem Problemkreis Waldschadensforschung auseinandersetzen und die, sofern sie mit der Ausbildung der Wurzelsysteme in einen Zusammenhang zu bringen sind, in der vorliegenden Arbeit berücksichtigt werden.

Das Untersuchungsgebiet liegt am NW-Abfall der Gleinalpe im Steirischen Randgebirge und umfasst im Wesentlichen den Talschlussbereich des Gleintales, das sich von St. Margarethen bei Knittelfeld westwärts bis zum Gleinalmsattel erstreckt. Nach den vorhandenen geologischen Karten zeigt das ausgewählte Gebiet im Bereich des Gleintales das geologisch differenzierteste Bild. Neben verschiedenen Amphiboliten treten Glimmerschiefer und Augengneise auf. Bei der Betrachtung der im Untersuchungsgebiet vorkommenden Baumarten fällt auf, dass Bodenbewegungen durch den Säbelwuchs der Europäischen Lärche (*Larix decidua*) angezeigt werden, während die Gewöhnliche Fichte (*Picea abies*) nur in den seltensten Fällen Säbelwuchs zeigt. Die Ursache dieser auffallenden Unterschiede bezüglich der Wuchsformen ist durch die verschiedenen Wurzelsysteme, beziehungsweise durch die unterschiedliche Reaktion der beiden Arten (sie werden in der Folge kurz als Lärche und Fichte bezeichnet) auf chemisch instabile Bodenverhältnisse bedingt (PROSKE, LAZAR & TRINKAUS 1994).

Die Böden des Untersuchungsgebietes

Für den Bodenzustand im Gleintal ist die Waldbewirtschaftung in der Vergangenheit von ausschlaggebender Bedeutung. Etwa seit dem 16. Jahrhundert wurden die Wälder der Glein durch die Vordernberger Radmeister-Kommunität zur Erzeugung von Kohlholz genutzt, die erst im 19. Jahrhundert eingestellt wurde. Die übliche Nutzungsform der Montanbetriebe war der Großkahlschlag. Das auf die Kahlschläge folgende Schlagbrennen, das ebenfalls gebräuchlich war, ermöglichte den einmaligen Anbau von Getreide (SCHNEITER 1970). Das nachfolgende Eintreiben von Vieh sollte den aufkommenden Graswuchs niederhalten und nach der Einsaat von Samen der Waldbäume diese in den Boden einbringen. Gezielte Aufforstungen von Kahlschlägen, fast ausschließlich mit Fichte, fanden erst in den 30iger Jahren unseres Jahrhunderts statt (MAJER 1989a). Häufige Holzkohlefunde in den Bodenprofilen belegen noch heute das Schlagbrennen und den Waldfeldbau (MAJER 1989b).

Diese lange zurückliegenden anthropogenen Eingriffe wirken auch heute noch im Bodenchemismus nach. Profile mit Holzkohleresten sind in allen Tiefenstufen durch durchschnittlich geringeren Humusgehalt des Mineralbodens gekennzeichnet. Durch die Bewirtschaftungsform der Brandkultur und des Waldfeldbaues wurde der Waldhumus weitgehend mineralisiert, daher der Humusgehalt reduziert und Kationen aus der organischen Substanz angereichert, wodurch ein pH-Anstieg induziert wurde (ENGLISCH 1989).

Die Böden des Untersuchungsgebietes sind durchwegs stark sauer und nur mäßig bis sehr gering mit Basen gesättigt. Weitere Charakteristika sind die geringe Kationen-Austauschkapazität, der im Durchschnitt sehr geringe Kalium-Gesamtvorrat, die unzureichende Kalzium-Ausstattung und die unterdurchschnittlichen Magnesium- und Manganwerte, die zum Teil miteinander korrelieren. Lediglich die Phosphor-Versorgung wird als durchschnittlich bis gut bezeichnet. Die insgesamt geringe Ausstattung des Auflagehumus mit Nährstoffen, insbesondere Stickstoff, wird von MAJER, KILIAN & MUTSCH 1989 auf die seit 200–350 Jahren betriebenen Kahlschlagwirtschaft und die dadurch geänderte Baumartenverteilung zurückgeführt.

Die Waldböden des Untersuchungsgebietes sind durchwegs junge, karbonatfreie, saure Silikatverwitterungsböden in der Vergesellschaftung Ranker-Felsbraunerde-Semipodsol (MAJER, KILIAN & MUTSCH 1989). Das unterschiedliche Ausgangsgestein kommt in der Profilmorphologie kaum zum Ausdruck. Es überwiegen dunkle, sepiabraun gefärbte, undeutlich horizontierte, tiefgründig humose Braunerden, wie sie für Amphibolit typisch sind. Entscheidender und die Bodendynamik prägend scheinen das Relief und die Höhenlage zu sein. So nimmt mit der Meereshöhe die Podsolierungstendenz zu, Braunerden sind dagegen eher auf sonnseitige, tiefere Lagen konzentriert. Ranker und seichtgründige Ranker-Braunerde liegen zumeist auf den verbreiteten Blockhalden und Felsfluren. Die laufende Umlagerung des Bodenmaterials auf den steilen Hängen verhindert eine ruhige Bodenentwicklung zu reiferen Profilen mit ausgeprägter Horizontdifferenzierung und trägt zu dem auffallend tiefreichenden Humusgehalt in fast allen Profilen bei. Nur an den flacheren Hangstufen und Unterhängen sind tiefgründige, feinerreichere kolluviale Braunerden akkumuliert und gelegentlich ungestörte, reifere Bodenformen ausgebildet.

Bezüglich des Bodenwasserhaushaltes stellen MAJER, KILIAN & MUTSCH 1989 fest, dass im Vergleich mit ähnlichen Gebirgslagen das gesamte Arbeitsgebiet relativ trocken erscheint. Die überwiegende Anzahl der 339 untersuchten Bodenproben fällt in die Wasserhaushaltsstufen „mäßig frisch“ und „frisch“ (= durchschnittliche Wasserversorgung). Besonders die verbreitet auftretenden dicht gelagerten, mit eingeregelter Nadelstreu abgedeckten Moderdecken sind auffallend undurchlässig für Wasser und weisen in ausgetrocknetem Zustand einen hohen Benetzungswiderstand auf. Sommerliche Niederschläge können dort lange nicht in den Boden eindringen, sondern fließen an der Oberfläche ab.

Unter den chemisch-physikalischen Vorgängen im Boden ist in erster Linie eine Bodenversauerung als Folge bodeninterner Versauerungsschübe zu registrieren, die bevorzugt unter reinen Fichtenbeständen auftritt. Sie setzt die Bodenqualität herab und führt langfristig zur Podsolierung (REHFUESS 1990). Als auslösender Faktor für die Bodenversauerung ist die Einwirkung übersäuerter Niederschläge anzusehen. Immissionsmessungen im Gleintal (Mess-Stelle Stanglhütte, 1000 m) schlossen auch die Messung der Niederschlags-pH-Werte ein (SMIDT 1989). Die Jahres-pH-Mittel betragen demnach 4,69 (1986) bzw. 4,56 (1987) und sind gegenüber dem Normalwert von 5,11 bis 6,10 als schwach bis deutlich abgesenkt einzustufen (SMIDT 1986). Aufgrund der gene-

rell geringen Basensättigung der Böden im Gleintal (MAJER, KILIAN & MUTSCH 1989) sind trotz der vergleichsweise eher schwachen pH-Wert-Absenkung im Niederschlagswasser Auswirkungen auf den Chemismus der Böden vor allem unter reinen Fichtenbeständen nicht auszuschließen. Die bodenchemischen Effekte anhaltender saurer Niederschläge sind sehr komplex und stark von der mineralogischen Zusammensetzung des Grundgesteins abhängig. Bei pH-Werten zwischen 4,2 und 5 werden bereits die basischen Kationen, die aus den Reaktionen von H^+ mit den Tonmineralien stammen, gelöst. Aluminium geht in Form von Aluminiumhydroxid in Lösung, die die basischen Kationen aus den Oktaederlücken der dreischichtigen Tonmineralien verdrängen (KUES & MURACH 1983). Bei anhaltender Versauerung werden die dreischichtigen Tonmineralien schließlich in zweischichtige umgebaut, die eine geringere Speicherfähigkeit für Kalzium und Magnesium besitzen (ULRICH 1983). In sehr stark bis extrem sauren Waldböden kann der Großteil der austauschbaren Kationen aus Al^{3+} -Ionen bestehen. Die Folge sind ausgeprägter Nährstoffmangel und toxische Wirkungen von Al^{3+} auf Waldbäume (SCHACHTSCHABEL & al. 1998). Nach HÜTTERMANN 1983 sind diese Kationen für die Pflanzen dann toxisch, wenn das molare Verhältnis $Al : Ca$ größer als 1 ist. In der Folge kommt es dadurch zu einer Verarmung austauschbar gebundener Nährstoffkationen, wobei vor allem bei Magnesium auch eine Beteiligung bei der Entstehung mancher neuartiger Waldschäden angenommen wird (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1992).

Die von der Forstlichen Bundesversuchsanstalt erhobene durchschnittliche Nährstoffsituation im Gleinalpen-Gebiet zeigt eine auffallende Kalzium- und Magnesiumarmut der Böden, wobei dieses Charakteristikum erwartungsgemäß bei den aus Augengneis hervorgegangenen Böden besonders ausgeprägt ist. Allerdings wurde festgestellt, dass im Vergleich zu Amphibolit-Braunerden anderer Gebiete auch die Böden auf diesem Substrat in der Glein unerwartet sauer und schlecht mit Hauptnährstoffen ausgestattet sind. Insbesondere die sonst hohen Mg-Gehalte liegen im Untersuchungsgebiet wesentlich tiefer. Zum Teil ist diese Abweichung aufgrund der chemischen Zusammensetzung der Aplit- und Bänderamphibolite aus Sicht der Geologie leicht begründbar. Aber auch auf dunklerem, basenreichen Gestein wurden auffallende Widersprüche zwischen den Analysedaten und dem typischen Profilaspekt sattbrauner und humoser Amphibolitbraunerde festgestellt. Es besteht der Eindruck einer Disharmonie zwischen der langfristigen Bodenentwicklung und dem derzeitigen bodenchemischen Zustand, der offenbar so jungen Datums ist, dass er auf die Profilentwicklung noch keinen Einfluss nehmen konnte. Hinweise auf akute Versauerungsvorgänge sind auch aus den hohen Anteilen an Fe und H am Ionenbelag mit 3 bis über 5 % ableitbar. Die ermittelten pH-Werte der Böden lagen zwischen 3,4 und 5,1, wobei die überwiegende Zahl der Werte knapp unter oder über pH 4 lag (MAJER, KILIAN & MUTSCH 1989).

Untersuchungen zur Wurzelmorphologie von Fichte und Lärche

KÖSTLER, BRÜCKNER & BIBELRIECHTER 1968 unterscheiden oberflächennahe, mehr oder weniger waagrecht, oder bei geneigtem Gelände parallel zur Oberfläche verlaufende Horizontalwurzeln von senkrecht beziehungsweise schräg vom Wurzelstock oder von Horizontalwurzeln abgehende Vertikalwurzeln. Diese Vertikalwurzeln sind weiter zu untergliedern in Pfahlwurzeln, Herzwurzeln und Senkwurzeln (= Senker). Pfahlwurzeln sind von der Stockunterseite entspringende, vertikal gerichtete Hauptwurzeln, bei Herzwurzeln handelt es sich um seitlich am Stock oder schräg von der Stockunterseite entspringende, mehr oder weniger in die Tiefe vordringende Wurzeln und Senkwurzeln sind von Horizontalwurzeln abzweigende, senkrecht oder schräg in die Tiefe vordringende Wurzeln.

Je nachdem, welcher dieser drei Wurzeltypen vorherrscht, werden die Begriffe Pfahl-, Herz- oder Senkerwurzelsystem verwendet. Die Begriffe Wurzelsystem, Wurzeltracht und Wurzelwerk umfassen die Gesamtheit der Wurzeln eines Baumes. Nach KÖSTLER, BRÜCKNER & BIBELRIECHTER 1968 weist die Lärche ein typisches Herzwurzelsystem auf, das durch eine etwa halbkugelartige Durchwurzelung des engeren Stockbereiches und das Fehlen weitstreichender Horizontalwurzeln, sowie die Abwesenheit einer führenden, vertikalen Hauptwurzel charakterisiert ist. Im Gegensatz dazu ist die Fichte mit einem Senkerwurzelsystem ausgestattet. Kräftige Horizontalwurzeln, von denen meist erst mit zunehmendem Alter Senker in vertikaler Richtung abgehen, dominieren.

Neben der bereits erwähnten Abhängigkeit der Wurzeltracht von der Spezies und dem Alter übt auch die physikalisch-chemische Beschaffenheit des Bodens einen nicht zu unterschätzenden Einfluss auf die Art der Durchwurzelung aus (siehe auch: KÖSTLER 1962, MELZER 1964, WAGG 1967 bzw. KÖSTLER, BRÜCKNER & BIBELRIECHTER 1968). STROHSCHNEIDER 1991 fasst diejenigen Standortfaktoren, die eine flache Durchwurzelung der Fichte bedingen, zusammen und führt diesbezüglich unter anderem Sauerstoffmangel, Trockenheit und Nährstoffmangel an.

Für die Beurteilung der Wurzeltracht von Fichte und Lärche wurden im gesamten Untersuchungsgebiet die Wurzelsysteme von bei Hangrutschungen umgerissenen Bäumen einer genauen Beobachtung unterzogen. Weiters wurden Horizontalwurzeln von Fichten und Lärchen, sowie mehr oder weniger vertikal verlaufende Wurzeln von Lärchen in verschiedener Entfernung vom Stamm holzanatomisch untersucht. Mit Hilfe eines Wurzelstechers (Zylinder: Höhe 10 cm, Radius 3,5 cm) wurden in fünf unterschiedlichen Entfernungen vom Stamm je einer Lärche und einer in unmittelbarer Nähe stehenden Fichte (über Glimmerschiefer) in verschiedenen Bodentiefen Proben entnommen (Monolithmethode nach BÖHM 1979). Mittels eines Wurzelselektors wurden die Wurzeln gereinigt, anschließend bei 105 °C 24 Stunden getrocknet und dann das Trockengewicht bestimmt. Sämtliche der folgenden Aussagen beziehen sich auf etwa 60-jährige Bäume.

Die Fichten wurzeln im gesamten Untersuchungsgebiet immer extrem flach. Fast 90 % (89,3 %) der Gesamtwurzelmasse befinden sich im Auflagehumus und in den

oberen 15 cm des Mineralbodens. In 35 bis 45 cm Tiefe ist nur mehr ein verschwindend geringer Prozentsatz (1,2 %) der Gesamtwurzelmasse festzustellen. Kräftige Senkwurzeln konnten niemals gefunden werden und in den wenigen Fällen, in denen überhaupt Senker festgestellt werden konnten, sind diese sehr dünn und auffallend kurz. Sie enden in geringer Tiefe (bis 20 cm) mit büscheligen, quastenartigen Verzweigungen. Keinen Einfluss auf diesen atypischen Bau der Senkwurzeln hat die Geologie. Sowohl über Amphiboliten, als auch über Glimmerschiefern und Augengneisen unterbleibt bei *Picea abies* die Ausbildung arttypische Senker.

Die Lärchen wurzeln wesentlich tiefer und zeigen eine typische Herzwurzeltracht. Nicht ganz 65 % (64,4 %) der Gesamtwurzelmasse befinden sich im Auflagehumus und in den obersten 15 cm des Mineralbodens. Der Anteil mehr oder weniger vertikal verlaufender Wurzeln ist also wesentlich höher als bei der Fichte. Die Hauptwurzelmasse der Lärchen liegt meist nicht direkt unter dem Stammfuß, sondern ist in Richtung hangaufwärts verlagert.

Die holzanatomischen Untersuchungen der Wurzeln ergaben wider Erwarten keine weitere Verschlechterung der Festigkeitseigenschaften der Fichte im Vergleich zur Lärche, da die Horizontalwurzeln der Fichte in der selben Entfernung vom Stamm wesentlich dickere Zellwände aufweisen als die der Lärche (TRINKAUS 2000, TRINKAUS 2001).

Das Ausbleiben einer Senkerbildung, beziehungsweise die Ausbildung atypisch kurzer Senker bei der Fichte wirkt sich mit Sicherheit in zweierlei Hinsicht negativ auf die Handstabilität aus, nämlich einerseits durch die nicht in ausreichendem Ausmaß vorhandene Verankerung in tieferen Bodenhorizonten und andererseits durch die geringe drainierende Wirkung. Inselartige Bereiche mit höheren Lärchenanteilen inmitten größerer Rutschhänge, sowie an Erosionshänge angrenzende Bereiche mit höheren Lärchenanteilen, die von Rutschungen verschont blieben, weisen auf die hangstabilisierende Funktion dieser Baumart hin.

Es wurde daher im Untersuchungsgebiet für Flächen mit einem Bestandesalter von weniger als 60 Jahren und für reine Fichtenbestände eine Erhöhung des Gefährdungspotentials angenommen. Ein Lärchenanteil größer als 30 % wurde in Hinsicht auf die Hangstabilität als stabilisierender Faktor in die Bewertung einbezogen (PROSKE, LAZAR & TRINKAUS 1994).

Diskussion

Da die atypische Tiefenverteilung der Wurzelmassen der Fichten und das Fehlen von Senkwurzeln, beziehungsweise die Ausbildung abnorm dünner und kurzer Senker schwer isoliert vom Allgemeinzustand der Fichten zu diskutieren sind, wird vorab kurz auf diese Thematik eingegangen.

Ende der Siebziger- und Anfang der Achtzigerjahre registrierte man im Untersuchungsgebiet einen deutlichen Anstieg des jährlichen Schadholzanfalles bei Fichten (DONAUBAUER 1989). GRILL, TAUSZ & STABENTHEINER 1993 machen Nährstoffmangel (ge-

ringe Versorgung der Fichtennadeln mit Stickstoff, Kalium und Magnesium – siehe STEFAN 1991) und Nährstoffungleichgewichte für den schlechten Allgemeinzustand der Fichten im Gleinalpen-Gebiet in erster Linie verantwortlich. Ein weiteres Indiz für die schlechte Nährstoffversorgung ist das Fehlen einer ausgesprochenen Schlagflora (KARRER 1989). Zusätzlich können Trockenheit, Schädigungen der Feinwurzeln (GÖBL 1989), Fraßschäden an Mykorrhizen (Löcher im Pilzmantel oder an apikalen Enden – GÖBL 1989), fortschreitende Mykorrhizza-Erosion (GÖBL 1991), Wurzel- und Stammfäulen (meist verursacht durch *Heterobasidion annosum* – siehe TOMICZEK 1990) oder Immissionsbelastungen, die im Gleinalpen-Gebiet jedoch vergleichsweise gering sind, und sich höchstens in Kombination mit bereits erwähnten Mangelerscheinungen oder Belastungen negativ auswirken (SMIDT 1991), zu Schäden führen.

Während die Lärchen im Untersuchungsgebiet eine für diese Spezies typische Wurzeltracht zeigen, kann das Wurzelsystem der Fichten keineswegs als arttypisch bezeichnet werden. Obwohl die geomorphologischen Voraussetzungen (die Gründigkeit der Bodenprofile liegt zum überwiegenden Teil zwischen 60 und 120 cm) für eine tiefer reichende Durchwurzelung gegeben wären, wurzeln die Fichten auffallend seicht.

Die Ursache dafür ist nicht mit einem Mangel an Sauerstoff zu begründen, denn laut STROHSCHNEIDER 1991 zeichnet sich die Lärche, wenn eine ausreichende Bodendurchlüftung gegeben ist, durch eine hohe Wurzelenergie und ein typisches Herzwurzelsystem mit gedrungenen, abholzigen, schräg bis teils abwärts gerichteten Hauptseitenwurzeln, die ovalen Querschnitt haben, aus, während im Gegensatz dazu das Wurzelwerk auf sauerstoffarmen Böden gestaucht wird. Die Tatsache, dass die Art der Durchwurzelung der Lärche im Gleinalpen-Gebiet für diese Spezies typisch ist (PROSKE, LAZAR & TRINKAUS 1994), spricht für die von MAJER, KILIAN & MUTSCH 1989 genannte Vermutung, nämlich dass nicht Sauerstoffmangel, sondern andere Parameter für die weitgehend fehlende Ausbildung von Senkern bei den Fichten verantwortlich sind.

Vielmehr dürfte die auffallend seichte Durchwurzelung des Bodens durch die Fichte auf der starken Versauerung des Oberbodens beruhen, da sich die Wurzeln aus den durch freie Aluminiumionen toxischen Bereichen in jene Horizonte zurückziehen, wo Aluminium als Komplex an den Humus gebunden und auch bei niedrigen pH-Werten nicht löslich ist. STROHSCHNEIDER 1989 stellte einerseits eine negative Korrelation zwischen austauschbarem Kalium im Boden und dem Aluminiumgehalt der Wurzeln und andererseits eine negative Korrelation zwischen dem Aluminiumgehalt des Bodens und dem Magnesiumgehalt der Wurzeln fest. Aluminium wirkt direkt auf Wurzeln, indem es die Zellteilung in den Meristemen hemmt, so dass die Wurzeln eine kurze und dicke Gestalt annehmen und schließlich aufgrund des reduzierten Wachstums in ihrer Ausdehnung auf den oberen Bereich des Bodens begrenzt bleiben (WILD 1995, ROWELL 1994). Formveränderungen von Feinwurzeln (Hemmung des Spitzenwachstums, Absterben der apikalen Zonen), wie sie aus Österreich bisher nicht bekannt waren, werden auch von GÖBL 1989 in einem geschädigten Fichtenbestand im Gleingraben beschrieben und mit dem Vorhandensein von Schadstoffen und mit freien Aluminiumionen in Zusammenhang gebracht.

Sowohl der schlechte Zustand der Feinwurzeln der Fichten, als auch die starken Abweichungen ihrer Wurzelsysteme von der Norm haben in erster Linie weit in die Vergangenheit zurückreichende Ursachen. Die seit Hunderten von Jahren betriebene Kahlschlagwirtschaft und die anschließenden Brandrodungen mit darauf folgendem Feldbau und die nachfolgende Beweidung haben mit Sicherheit die Böden, bis heute geprägt. In Kombination mit diesen Belastungen wirken sich saure Niederschläge äußerst negativ auf die Vitalität der Feinwurzeln und auf die Tiefenverteilung der Grobwurzeln der Fichten aus.

Dank

Das der vorliegenden Arbeit zugrunde liegende Forschungsprojekt wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Wissenschaft und Forschung und der Steiermärkischen Landesregierung durchgeführt.

Literatur

- BÖHM W. 1979: Methods of studying root systems. – Berlin, Heidelberg, New York.
- DONAUBAUER E. 1989: Das Walderkrankungssyndrom im Gleinalmgebiet. – Mitt. Forstl. Bundesvers. Anst. Wien **163(1)**: 5–9.
- ENGLISCH M. 1989: Schwermetallgehalte in den Böden der Gleinalm. – Mitt. Forstl. Bundesvers. Anst. Wien **163(2)**: 405–415.
- GÖBL F. 1989: Mykorrhiza- und Feinwurzeluntersuchungen im Waldschadensgebiet Gleingraben und Gleinalpe (Steiermark). – Mitt. Forstl. Bundesvers. Anst. Wien **163(1)**: 171–220.
- GÖBL F. 1991: Mykorrhiza- und Feinwurzeluntersuchungen im Waldschadensgebiet Gleingraben und Gleinalpe (Stmk). – Mitt. Forstl. Bundesvers. Anst. Wien **163(4)**: 31–49.
- GRILL D., TAUSZ M. & STABENTHEINER E. 1993: Waldwirtschaftskonzepte Gleinalm. Projektteil Luftchemische Stresse. – Endbericht Bd. 1, Univ. Graz.
- HÜTTERMANN A. 1983: Frühdiagnose von Immissionsschäden im Wurzelbereich von Waldbäumen. – Immissionsbelastungen von Waldökosystemen, Landesanst. f. Ökol. NRW, Recklinghausen, 26–31.
- KARRER G. 1989: Vegetationskundliche Charakterisierung des Gleingrabens bei Knittelfeld (Steiermark). – Mitt. Forstl. Bundesvers. Anst. Wien **163(1)**: 129–170.
- KÖSTLER J. 1961: Untersuchungen zur Wurzelbildung. – Allg. Forstz. **28**: 1–4.
- KÖSTLER J., BRÜCKNER E. & BIBELRIETHER H. 1968: Die Wurzeln der Waldbäume. Untersuchungen zur Morphologie der Waldbäume in Mitteleuropa. – Hamburg, Berlin.
- KUES J. & MURACH D. 1983: Saurer Regen und Waldsterben. – Anette Grundlach Studentexte, Göttingen.

- MAJER C. 1989a: Zu Klima, Geologie und Waldgeschichte des Waldschadensgebietes Gleinalm. – Mitt. Forstl. Bundesvers. Anst. Wien **163(1)**: 11–24.
- MAJER C. 1989b: Hinweise auf anthropogene Einwirkungen auf den Boden. – Mitt. Forstl. Bundesvers. Anst. Wien **163(1)**: 25–32.
- MAJER C., KILIAN W. & MUTSCH F. 1989: Die Böden im Gleinalmgebiet. – Mitt. Forstl. Bundesvers. Anst. Wien **163(1)**: 33–127.
- MELZER E. 1964: Vergleich der Wurzelbildung zwischen meliorierten und nichtmeliorierten Standorten der Oberförsterei Adorf/Vogtland. – Arch. Forstwes. **13**: 615–625.
- PROSKE H., LAZAR R. & TRINKAUS P. 1994: Erfassung und Darstellung geogen bedingter Boden- und Gebirgsinstabilitäten unter besonderer Berücksichtigung einer Katastrophenvorsorge. – Endbericht, Joanneum Research, Graz.
- REHFUESS K. 1990: Waldböden. Entwicklung, Eigenschaften und Nutzung. – Hamburg, Berlin.
- ROWELL D. L. 1994: Bodenkunde. – Berlin, Heidelberg, New York.
- SCHACHTSCHABEL P., BLUME H. P., BRÜMMER G., HARTGE K. H. & SCHWERTMANN U. 1998: Lehrbuch der Bodenkunde. – 14. Aufl., Stuttgart.
- SCHAEFFER F. & SCHACHTSCHABEL P. 1992: Lehrbuch der Bodenkunde. – 13. Aufl., Stuttgart.
- SCHNEITER E. 1970: Agrargeschichte der Brandwirtschaft. – Forschungen zur geschichtlichen Landeskunde der Steiermark, Historische Landeskommission Graz, Band XXV.
- SMIDT S. 1986: Bulk-Messungen in Waldgebieten Österreichs, Ergebnisse 1984 und 1985. – FBVA-Berichte **13**, Wien.
- SMIDT S. 1989: Immissionsmessungen im Gleinalmgebiet. – Mitt. Forstl. Bundesvers. Anst. Wien **163(2)**: 225–263.
- STEFAN K. 1991: Zur Nährelementversorgung der Fichtennadeln von gedüngten und ungedüngten Bäumen im Gleinalmgebiet. – Mitt. Forstl. Bundesvers. Anst. Wien **163(4)**: 65–140.
- STROHSCHNEIDER I. 1989: Beziehung zwischen dem Chemismus von Wurzel und Boden an ausgewählten Punkten der Gleinalm. – Mitt. Forstl. Bundesvers. Anst. Wien **163(2)**: 265–288.
- STROHSCHNEIDER I. 1991: Standorte der Sturmschadensgebiete 1990 mit Blick in den „unterirdischen Wald“. – Österreichische Forstz. **4**: 31–34.
- TOMICZEK C. 1990: Forstpathologische Erhebungen in der Glein. – Mitt. Forstl. Bundesvers. Anst. Wien **163(3)**: 39–97.
- TRINKAUS P. 2000: Untersuchungen zur Wurzelholzanatomie von Fichte (*Picea abies*) und Lärche (*Larix decidua*). – Linz. Biol. Beitr. **32(2)**: 710–711.
- TRINKAUS P. 2001: Untersuchungen zur Wurzelholzanatomie von *Larix decidua* und *Picea abies* unter besonderer Berücksichtigung des Baues der Längstracheiden. – Linz. Biol. Beitr. **33(1)**: 325–333.
- ULRICH B. 1983: Gefahren für das Waldökosystem durch saure Niederschläge. – Immissionsbelastungen von Waldökosystemen, Landesanst. f. Ökol. NRW, Recklinghausen, 9–25.
- WAGG J. W. B. 1967: Origin and development of white spruce root forms. – For. Branch Dep. Ottawa **1192**: 1–45.
- WILD A. 1995: Umweltorientierte Bodenkunde. – Heidelberg, Berlin, Oxford.

Anschriften der Verfasser:

Mag. Dr. Peter TRINKAUS
Joanneum Research
Institut für Nachhaltige Techniken und Systeme
Mauritzener Hauptstraße 3
A-8130 Frohnleiten
peter.trinkaus@joanneum.at

Mag. Herwig PROSKE
Joanneum Research
Institut für Digitale Bildverarbeitung
Wastiangasse 6
A-8010 Graz
herwig.proske@joanneum.at

Mag. Volker STRASSER
Wasserland Steiermark
Stempfergasse 7
A-8010 Graz