

*Lehrstuhl für Forstbotanik der Universität München
und Kontron-Bildanalyse GmbH, Eching*

Wurzelschäden und Waldsterben: Zur Bestimmung morphometrischer Kenngrößen von Feinwurzelsystemen mit dem IBAS – erste Ergebnisse

VON H. BLASCHKE, U. BREHMER UND H. SCHWARZ

Einleitung

Auf die Notwendigkeit weiterführender Feinwurzelstudien zum besseren Verständnis der biodynamischen Vorgänge in Waldökosystemen, besonders auch im Zusammenhang mit den zu beobachtenden „neuartigen Waldschäden“ (Anonymus 1984), wurde wiederholt hingewiesen (PERSSON 1981, 1983; BLASCHKE 1981 b).

Die Feinwurzelentwicklung kann zudem als ein empfindlicher Bioindikator für die Vitalität und auch für die Belastung der Waldbäume unter dem Einfluß von Luftverunreinigungen angesehen werden.

Nach den heutigen Kenntnissen sind beim Waldsterben in aller Regel Wurzelschäden maßgeblich beteiligt (ULRICH u. MATZNER 1983), die entsprechend der Zuwachsreduktion nach einer Schädigung der Assimilationsorgane auf hohe Feinwurzelverluste zurückgeführt werden können (SCHÜTT et al. 1983).

Aus den verschiedensten Gründen war es bisher nur punktuell möglich, die Schäden an Wurzelsystemen quantitativ zu erfassen. Nicht zuletzt der hohe Arbeits- und Zeitaufwand stand einer umfassenden Inventur entgegen. Ziel der vorliegenden Arbeit war es, durch Entwicklung einer geeigneten Methode diesen Zeitaufwand zu minimieren. Gleichzeitig sollte ein Weg aufgezeigt werden, wie der hohe Informationsgehalt von Feinwurzeluntersuchungen und rhizographischen Erhebungen (BLASCHKE 1981 a) datenmäßig genutzt werden kann.

Die hier vorgestellten Ergebnisse sind Teil einer gemeinsamen Pilotstudie der Lehrstühle für Bodenkunde und Forstbotanik (BOSCH et al. 1983; LISS et al. 1984), die sich mit dem Fichtensterben in den Hochlagen des Bayerischen Waldes beschäftigte und auf einen Vergleich geschädigter und symptomfreier Jungfichten ausgedehnt wurde.

Im Rahmen dieser Untersuchungen wurde erstmals ein neues leistungsfähiges Bildanalyse-system (IBAS) eingesetzt, das schwerpunktmäßig eine exakte quantitative Erfassung verschiedener Kenngrößen von Feinwurzelsilhouetten (BLASCHKE 1981 a) ermöglichen sollte, nicht zuletzt, um erste generelle Hinweise auf die Einsatzmöglichkeiten des IBAS am Beispiel einer Fallstudie zu geben.

Material und Methode

Als Untersuchungsmaterial dienten 7–10-jährige Fichten aus Naturverjüngungen in den Forstämtern Bodenmais (Höhe 1200 m über NN) und Neureichenau (Dreisessel, Höhe 1150 m über NN). Eine ausführliche Beschreibung der Bestände und der standörtlichen Verhältnisse findet sich bei BOSCH et al. (1983) und LISS et al. (1984). Die Probenahmen erfolgten am 6. 6. und 23. 8. 1983.

Auf beiden Probestandorten wurden jeweils 2×5 benachbarte Fichten ausgewählt, wobei die symptomfreien (SF) und die geschädigten (S, Schadensklasse 1–2) Fichten jeweils unter offensichtlich ähnlichen kleinstandörtlichen Bedingungen wuchsen. Bei der Probengewinnung wurden die Fichten unter Vermeidung von Fein- und Grobwurzelbeschädigungen vorsichtig ausgegraben, einzeln in Plastiktüten verpackt und kühl gelagert. Die Probenaufbereitung für die Feinwurzeluntersuchung erfolgte im Labor nach der bei Liss et al. (1984) eingehend beschriebenen Methode. Neben dem Wurzelsystem wurde der Sproß einer getrennten Auswertung zugeführt; wir bestimmten folgende Kenngrößen:

- Sproßlänge, Trieblänge
- Sproß- und Nadel trockenmasse
- Trockenmasse von Grob- und Feinwurzeln
- Wurzelhalsdurchmesser

Nach Anfertigung eines Wurzelherbars dienten die Feinwurzel silhouetten in Form kontrastreicher Fotokopien als Bildvorlage für die quantitative Auswertung mit dem IBAS (Fa. Kontron, Eching bei München).

Meßprinzip und Software

Das Interaktive Bild-Analyse-System IBAS besteht aus zwei Komponenten: Einem Bildverarbeitungsteil (IBAS 2), welcher die Speicherung, Verbesserung und quantitative Auswertung einer Bildvorlage durchführt, und einem Kontrollrechner (IBAS 1), der das gewonnene Datenmaterial statistisch analysiert und graphisch aufbereitet. Für beide Komponenten und deren zugehörige Teilaufgaben steht eine große Anzahl von Standardprogrammen zur Verfügung, welche in einer leicht erlernbaren Menütechnik bedient werden; Programmierkenntnisse sind nicht notwendig.

Die Eingabe des Bildes geschieht meist über eine Fernsehkamera, welche auf einem Mikroskop montiert ist, oder an einem Macroviewer, um auch makroskopische Bildvorlagen auswerten zu können; im vorliegenden Beispiel war das der Fall. Darüber hinaus können andere Bildquellen wie Elektronenmikroskope, Photometer, etc. an das System angeschlossen werden. Unabhängig vom Bildgeber wird das Bild digitalisiert, d. h. in Rasterpunkte zerlegt und in einem speziellen Speicher des IBAS 2 abgelegt. Dabei hat jeder Rasterpunkt eine Grauwertauflösung von 256 Stufen. Die zur Verfügung stehenden Bildverarbeitungsalgorithmen wie Rauschunterdrückung, digitale Filterung, Kontrastoptimierung etc. operieren über einen speziellen Prozessor direkt auf dem gespeicherten Bild. Die extrahierten quantitativen Meßdaten (morphologische und densitometrische Parameter, beispielsweise Fläche, Umfang oder Transmission von Objekten) werden zur Weiterverarbeitung dem Mikroprozessor des IBAS 1 zugeführt. Die Auswertesoftware umfaßt u. a. Einfach- und Doppelklassierung, t-Test, Korrelationsanalyse, lineare Regression und Kolmogoroff-Smirnow-Test.

Die fotokopierten Wurzelherbarexemplare wurden unter Verwendung eines Makroviewers von einer Fernsehkamera aufgenommen digitalisiert und im Bildspeicher abgelegt. Das System wurde auf mm geeicht. Um Variationen in der Untergrundhelligkeit auszugleichen, wurde eine Shadingkorrektur nach dem Referenzbildverfahren durchgeführt, daran anschließend eine Kantenverstärkung, um auch die feinen Wurzel details hervorzuheben. Danach wurde das Bild diskriminiert, d. h. es wurde ein Binärbild erzeugt. Dieses Bild wurde weiter einer Skeletonisierung unterzogen; das war Voraussetzung für die genaue Längenmessung der Wurzelsegmente. Unter Zuhilfenahme eines speziellen Algorithmus wurden die Verzweigungs- und Endpunkte des Wurzelherbars bestimmt und gezählt. Darüber hinaus wurden neben den bereits angeführten morphologischen Parametern weitere Kenngrößen ermittelt:

- Fläche und Umfang der Feinwurzel silhouetten
- Zahl der Wurzelsegmente
- Mittlere Segmentlänge

Ergebnisse und Diskussion

Die Abbildungen 1-6 zeigen beispielhaft die verschiedenen Schritte der Bildverarbeitung im IBAS, die zur Bestimmung der wurzelmorphologischen Kenngrößen führten.

Es war zu erwarten, daß sich die symptomfreien (SF) von den geschädigten (S) Fichten in mehrfacher Hinsicht unterscheiden, da nach dem heutigen Stand des Wissens die Schädigung im Kronenbereich der vom Waldsterben betroffenen Bäume zu einer Beeinträchtigung des Feinwurzelsystems führt (SCHÜTT et al. 1983). Wir konnten deshalb anhand des zur Verfügung stehenden Materials überprüfen, ob sich der Zusammenhang zwischen der Zuwachsreduktion und den Nadelverlusten – gemessen an der Biomasse von Nadeln und verholzter Sproßachse – und der Bewurzelung in den Untersuchungsergebnissen niederschlägt.

Tatsächlich ergab die Auswertung der Kenngrößen bei vergleichender Betrachtung von natürlich verjüngten SF und S Fichten auf gleichem Standort mehrere Hinweise auf die Parallelität der Schädigung von Feinwurzeln und Nadeln.

In Tabelle 1 sind die Mittelwerte der wurzelmorphologischen Kenngrößen zusammengefaßt, die herangezogen wurden, um in Verbindung mit den Biomassedaten auf die physiologisch-ökologische Bedeutung der Feinwurzelsysteme hinzuweisen.

So stellen beispielsweise die Feinwurzellängen und die Verzweigungs- und Endpunkte (= Wurzelspitze) ein Maß für die Feinwurzelintensität dar, aus der sich die Effektivität des Wurzelsystems abschätzen läßt (BLASCHKE 1981, HUCK 1977).

Abbildung 7 informiert über den Schwankungsbereich der Trockensubstanzwerte von Sproß und Wurzeln.

Zur Überprüfung der Unterschiede zwischen S und SF Fichten wurden die Merkmalskorrelationen und die Biomassen miteinander verglichen. Aus den Daten geht hervor, daß die Wachstumseinbußen mit einer Verschiebung der relativen Biomasseanteile verbunden sind. Betrachtet man zunächst Feinwurzeln und Nadeln und errechnet daraus die entsprechenden Sproß/Wurzel-Verhältnisse, so stellt man eine Reihe von Zusammenhängen fest.

Es zeigt sich, daß mit der Verminderung der Nadelmasse um 30 % eine Abnahme der Feinwurzelbiomasse um 40 % verbunden ist. Demzufolge erweiterte sich das Sproß/Wurzel-Verhältnis von 2,9 (SF) auf 3,3 (S). Bezogen auf die Sproßtrockensubstanz erhöhte sich zugleich die Nadelbiomasse von 82 % (SF) auf 104 % (S). Die Korrelationen zwischen Nadel- und Feinwurzelbiomasse sind mit $r = 0,99$ (S) und $r = 0,82$ (SF) hoch signifikant.

Das Verhältnis von Fein- zu Grobwurzelmasse zeigt ebenso deutliche Unterschiede zwischen SF und S Fichten, die auf gravierende Degradationserscheinungen im Feinwurzelbereich

Tabelle 1

Vergleich zwischen den Kenngrößen der Feinwurzelsysteme von symptomfreien (SF) und geschädigten (S) Fichten (\pm Mittelwert, $S\bar{x}$ Standardfehler des arithmetischen Mittels, P Irrtumswahrscheinlichkeit)
 Comparison between the characteristics of fine-root systems of non-symptomatic (SF) and affected (S) Norway spruces (\pm = mean; $S\bar{x}$ = standard error of the mean; P = error probability)

	SF (n = 10)	S (n = 10)	P
Wurzelhalsdurchmesser (mm)	10,1 \pm 0,8	8,2 \pm 0,6	1 % < P < 5 %
Feinwurzellänge (cm)	717 \pm 188	427 \pm 128	10 % < P < 20 %
Zahl der Segmente	684 \pm 202	419 \pm 140	10 % < P < 20 %
Mittlere Segmentlänge (cm)	1,13 \pm 0,05	1,07 \pm 0,07	1 % < P < 5 %
Verzweigungs- und Endpunkte	1157 \pm 338	708 \pm 212	20 % < P < 30 %
Feinwurzellfläche (cm ²)	126,3 \pm 28,5	74,2 \pm 20,9	P < 0,1 %
Feinwurzelumfang (cm)	1447 \pm 330	1151 \pm 338	5 % < P < 10 %



Abb. 1. Wurzelherbar, Original
Fig. 1. Root (herbarium specimen; original)



Abb. 2. Kantenverstärkung zur Hervorhebung feiner Details
Fig. 2. Contour enhancement to emphasize fine details



Abb. 3. Binärbild, erzeugt durch Diskriminierung des Bildes in Abb. 2
Fig. 3. Binary image, resulting from discrimination of the image presented in Fig. 2



Abb. 4. Skeleton des Binärbildes; Voraussetzung für eine exakte Längenmessung
Fig. 4. Skeleton of the binary image; necessary for correct length measurement

zurückzuführen sind. Wir konnten die Wurzelschädigung an der Abnahme des Feinwurzelanteils feststellen, der lediglich 47 % (S) gegenüber 60 % (SF) beträgt. Sicherlich sind bei stärker geschädigten Fichten noch höhere Feinwurzelverluste zu erwarten (BLASCHKE 1985).

Es ergaben sich ferner straffe Korrelationen zwischen der Feinwurzelmasse und der Anzahl der Segmente: $r = 0,95$ (SF) und $r = 0,97$ (S). Dementsprechend sind auch die positiven Korrelationen zwischen der Fläche, dem Umfang und der Feinwurzelbiomasse verständlich und erübrigen eine weitere Besprechung.

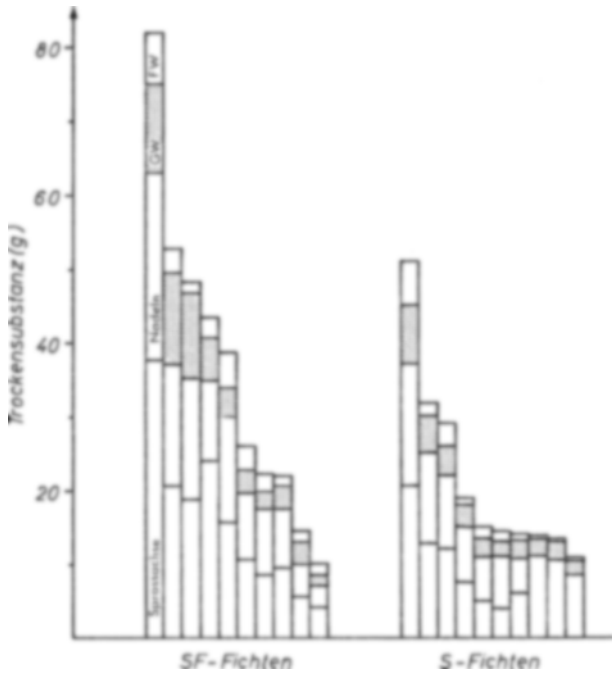


Abb. 7. Biomasseverteilung in Sproß und Wurzel von je 10 symptomfreien (SF) und geschädigten (S) Fichten (Alter 7-10 Jahre). GW Grobwurzeln, FW Feinwurzeln $\varnothing < 2$ mm

Fig. 7. Biomass distribution in shoots and roots of each 10 non-symptomatic (SF) and affected (S) Norway spruces (age 7-10 years). GW coarse roots, FW fine roots $\varnothing < 2$ mm

bunden ist, eine abschließende Bewertung der Veränderungen im Feinwurzelbereich vorzunehmen, weil dessen quantitative wie qualitative Zusammensetzung im wesentlichen von dynamischen Prozessen und verschiedenen Wachstumsfaktoren bestimmt wird, so zeichnet sich doch bereits jetzt ab, daß die von uns eingesetzte Bildanalyse zukünftig eine brauchbare Methode darstellt, die einen entscheidenden Beitrag im Rahmen von weiterführenden Feinwurzeluntersuchungen leisten kann.

Zusammenfassung

In einer vergleichenden Untersuchung von Feinwurzelsystemen wurde erstmals ein Bildanalyse-system (IBAS) eingesetzt, um Schäden am Wurzelsystem der Fichte quantitativ zu erfassen.

Die ermittelten Kenngrößen der Feinwurzelsysteme, wie z. B. Verzweigung, Segmentlänge und Fläche ergaben einen deutlichen Zusammenhang zwischen den Zuwachsverlusten und der Feinwurzelintensität.

Die Befunde werden mit Blick auf die Schädigung der Assimilationsorgane im Zuge des Waldsterbens diskutiert.

Summary

*Root damage and forest decline
Characterizing morphological attributes of fine-root systems
of Norway spruce - first results*

Morphological attributes of the fine-root component were estimated by using an image analysing system (IBAS).

There was a positive correlation between growth reduction of the shoot and fine-root intensity. The trends concerning the rooting pattern are discussed in relation to damage which occurs in the needles of trees affected by Waldsterben.

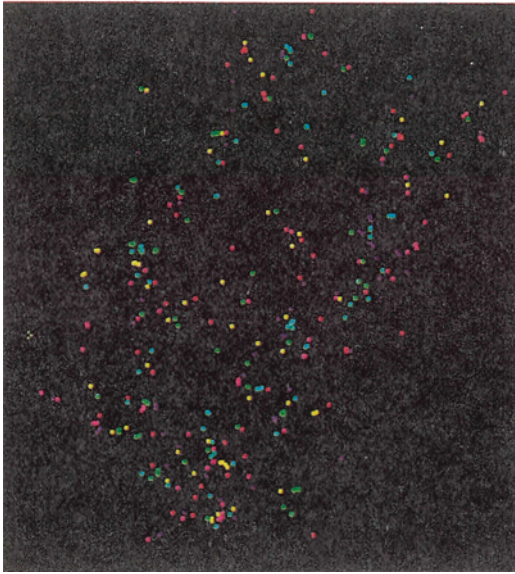


Abb. 5. Verzweigungs- und Endpunkte der Feinwurzelsysteme

Fig. 5. Branching- and terminal points of the fine-root-systems

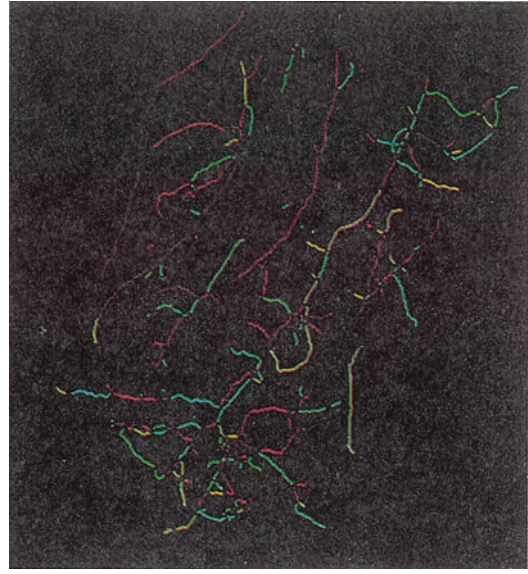


Abb. 6. Feinwurzeln, getrennt in Segmente

Fig. 6. Fine-root-segments

Im Verlauf der Auswertung des Wurzelmaterials konnten wir in Übereinstimmung mit früheren Ergebnissen bei Alt-fichten (Liss et al. 1984) die Befunde dahingehend erweitern, daß die wurzelmorphologischen Kenngrößen der Fichten aus Naturverjüngungen ebenso eindeutige Hinweise auf Schädigungen des Wurzelsystems ergeben, die mit oberirdischen Symptomen wie z. B. den Nadelverlusten in Beziehung gesetzt werden können.

Aufgrund der großen Streubreite einzelner Kenngrößen und der geringen Probenzahl war bei Wurzelstudien bisher ein exakter Vergleich zwischen verschiedenen Standorten nicht möglich (KERN et al. 1961; REITER et al. 1983).

Berücksichtigt man jedoch, daß dem Feinwurzelsystem eine Dynamik zugrunde liegt, die endogen kontrolliert, mit einem Assimilatverbrauch verbunden ist und darüber hinaus Umwelteinflüsse zu Veränderungen des Wachstums führen können (MERRITT 1968; PERSSON 1981; BLASCHKE 1981; MEYER 1984), so deuten die erfaßten Kenngrößen direkt in Richtung auf die Veränderungen im Feinwurzelsystem, die zu einer Verschiebung des Sproß/Wurzel-Verhältnisses geführt haben. Sehr aufschlußreich sind in diesem Zusammenhang die in beiden Fällen (S, SF) straffen Korrelationen von jeweils $r = 0,98$ zwischen der Feinwurzellänge und der Zahl der Verzweigungs- und Endpunkte.

Daneben zeigte sich, daß ähnlich hohe Korrelationen von $r = 0,90$ (S) bzw. $r = 0,75$ (SF) zwischen der Verzweigungsintensität – gemessen an der Zahl der Wurzelspitzen – und der oberirdischen Biomasse bestehen.

Aus dem Vergleich der Daten wird ferner ersichtlich, daß nicht nur die Verzweigungsintensität, die sich aus der Segmentzahl und der Anzahl der Wurzelspitzen ableiten läßt, Aufschluß über die Bewurzelungsverhältnisse gibt, sondern daß darüber hinaus diese Kenngrößen in den untersuchten Fällen wiederum mit der Nadelmasse korreliert sind: $r = 0,74$ und $r = 0,75$ (SF) bzw. $r = 0,86$ und $r = 0,83$ (S).

Zur Beurteilung und Quantifizierung der Wurzelschäden konnten wir uns schließlich der Anzahl der Segmentlängen bedienen, die sich aus der Struktur der Feinwurzelsysteme ergaben und auf die Zahl der Kurz- und Langwurzeln hindeuten.

Wenn es auch aufgrund der zweimaligen Probenahme und dem relativ geringen Umfang des zur Verfügung stehenden Untersuchungsmaterials noch mit gewissen Einschränkungen ver-



Tafel 1. Oben links und rechts: Nadelröte an Zweigen aus 4 m Baumhöhe (Herkunft Hann. Münden). Unten links: Verfärbung älterer Nadeln an einem Zweig aus 12 m Höhe (Herkunft Hann. Münden). Unten rechts: Aus rotbraunen Nadeln auf Malzagar auswachsendes Myzel; weiße Kulturen: *Lophodermium piceae*, kleine dunkelbraune Kulturen: *Rhizosphaera pini*, große dunkelbraune Kultur: *Rhizosphaera kalkhoffii* (Herkunft Valepp-Tal)

Table 1. Top left and right: "Nadelröte" from twigs at 4 m tree height (location Hann. Münden). Left below: Discoloration of older needles from a twig at 12 m tree height (location Hann. Münden). Right below: Mycelium growing from reddish-brown needles on malt agar. white cultures: *Lophodermium piceae*, small dark-brown cultures: *Rhizosphaera pini*, large dark-brown culture: *Rhizosphaera kalkhoffii* (location Valepp valley)

Literatur

- Anonymus, 1984: Forschungsbeirat Waldschäden/Luftverunreinigungen der Bundesregierung und der Länder, Zwischenbericht Dezember 1984, pp. 123.
- BLASCHKE, H., 1981a: Rhizographische Untersuchungen an Feinwurzelsystemen aus verschiedenen *Abies alba*-Beständen Bayerns. *Europ. J. For. Path.* 11, 87-97.
- BLASCHKE, H., 1981b: Veränderungen bei der Feinwurzelentwicklung in Weißtannenbeständen. *Forstw. Cbl.* 100, 190-195.
- BLASCHKE, H., 1985: Wurzelschäden und Waldsterben: Degradationserscheinungen an Feinwurzeln und Mykorrhizen. *Österr. Forschungszt. Seibersdorf, Ber. No. 4316*, 46-58.
- BOSCH, C.; PFANNKUCH, E.; BAUM, U.; REHFUESS, K. E., 1973: Über die Erkrankung der Fichte in den Hochlagen des Bayerischen Waldes. *Forstw. Cbl.* 102, 167-181.
- HUCK, M. G., 1977: Root distribution and water uptake patterns. In: *The belowground ecosystem: A synthesis of plant associated processes*, 215-226, Range Sci. Dept. Ser. 26, Colorado State Univ. Fort Collins.
- KERN, K. G.; MOTT, W.; BRAUN, H. J., 1961: Wurzeluntersuchungen in Rein- und Mischbeständen des Hochschwarzwaldes (Vfl. Todtmoos 2/1-IV). *Allg. Forst. Jagdztg.* 132, 241-260.
- LISS, B.; BLASCHKE, H.; SCHÜTT, P., 1984: Vergleichende Feinwurzeluntersuchungen an gesunden und erkrankten Altfichten auf zwei Standorten in Bayern - ein Beitrag zur Waldsterbensforschung. *Europ. J. For. Path.* 14, 90-102.
- MERRITT, C., 1968: Effect of environment and heredity on the root growth pattern of red pine. *Ecology* 49, 34-40.
- MEYER, F. H., 1984: Mögliche Kausalketten des Waldsterbens. *Zeitschr. Uni Hannover* 11, 56-60.
- PERSSON, H. A., 1981: Death and replacement of fine roots in forest ecosystem - a neglected area of research. *Swed. Conif. For. Proj., Tech. Rep.* 29, 1-25.
- PERSSON, H. A., 1983: The distribution and productivity of fine roots in boreal forests. *Plant and Soil* 71, 87-101.
- REITER, H.; ALCUBILLA, M.; REHFUESS, K. E., 1983: Standortskundliche Studien zum Tannensterben: Ausbildung und Mineralstoffgehalte der Wurzeln von Weißtannen (*Abies alba* Mill.) in Abhängigkeit vom Gesundheitszustand und Boden. *Allg. Forst. Jagdztg.* 154, 82-92.
- SCHÜTT, P., BLASCHKE, H.; HOQUE, E.; KOCH, W.; LANG, K. J.; SCHUCK, H. J.; 1983: Erste Ergebnisse einer botanischen Inventur des „Fichtensterbens“. *Forstw. Cbl.* 102, 158-166.
- ULRICH, B.; MATZNER, E., 1983: Abiotische Folgewirkungen der weiträumigen Ausbreitung von Luftverunreinigungen Luftreinhaltung Forschungsbericht 10402615, UBA Berlin.
- Anschriften der Verfasser:* Dr. H. BLASCHKE, Dr. U. BREHMER, Lehrstuhl für Forstbotanik der Universität München, Amalienstraße 52, D-8000 München 40; Dr. H. SCHWARZ, Kontron Bildanalyse GmbH, Breslauer Straße 2, D-8057 Eching bei München, FRG

Qualitätsänderungen des Waldhumus

Von E. v. ZEJSCHWITZ

1 Zur Problematik

Bei der in Nordrhein-Westfalen seit 30 Jahren praktizierten Methode der forstlichen Standort-erkundung (WACHTER 1972) werden die Ergebnisse großmaßstäbiger Bodenkartierungen zugrunde gelegt. Die Bodenkarten enthalten unter anderem Angaben über den Basengehalt des Bodens, und zwar in fünf Stufen von basenreich bis basenarm.

Zur Einschätzung des Basengehaltes bedient man sich verschiedener anderer Boden- und Standortmerkmale. Unter Berücksichtigung der petrographischen Eigenschaften der Ausgangsgesteine und der Geogenese der bodenbildenden Substrate (überwiegend Lockergesteine) kann der Basengehalt des Bodens überschlägig beurteilt werden. Genauere Einschätzungen sind aufgrund der entwickelten Humusform möglich. Zahlreiche Untersuchungen haben nämlich übereinstimmend belegt, daß nicht nur zwischen den nach makromorphologischen Merk-