

Tonminerale von Waldböden des Lößgebietes um Regensburg in Abhängigkeit vom Aziditätsmilieu und dem Bestockungsgrad

Hans-Peter NILLER & Jörg VÖLKE

Universität Regensburg, Lst. f. Physische Geographie, D-93040 Regensburg

Zusammenfassung

Dokumentiert wird der Versauerungsgrad von Parabraunerden des Lößgebietes südlich von Regensburg. Dabei können bestandesabhängige Tendenzen in der Versauerung festgestellt werden. Diese Tendenzen zeigen sich in den pedochemischen Parametern eindeutiger als in den tonmineralogischen. In den A(e)h-Horizonten ist bereits ansatzweise eine Auflösung sekundärer Al-Chlorite nachweisbar. Damit ist trotz des gut gepufferten Ausgangssubstrates auch im Lößgebiet ein weit fortgeschrittenes Aziditätsmilieu feststellbar, daß teilweise zu einer irreversiblen Degradierung der Tonminerale in den humosen Oberböden geführt hat. Der maximale Anteil sekundärer Chlorite liegt in den Lessivierungshorizonten der untersuchten Parabraunerden. Die Lessivierungshorizonte zeichnen sich aufgrund geringer Humus- und Tongehalte sowie der Zusammensetzung der Tonfraktion durch ihre starke ökologische Benachteiligung aus.

1 Einleitung

Die weit verbreitete und tiefreichende Versauerung von Waldböden Mitteleuropas ist bekannt und teilweise bereits rastermäßig erfaßt. Konzentrierte sich die Forschung zur Bodenversauerung anfänglich auf die Mittelgebirgsregionen, die durch Böden aus basenarmen Ausgangssubstraten gekennzeichnet sind, so folgten in jüngerer Zeit Arbeiten, die sich mit der Bodenversauerung auf ursprünglich gut gepufferten Substraten (Löß) beschäftigen (WEBER 1990, VEERHOFF 1992). Die ursprüngliche Konzentration in der Forschung auf die Mittelgebirgsregionen ist vor allem vor dem Hintergrund der dort verstärkt aufgetretenen neuartigen Waldschäden verständlich. Als Faktoren, die Ausmaß und Ablauf der Bodenversauerung modifizieren können, sind Ausgangsmaterial (Substratabhängigkeit), Bestockung (Bestandesabhängigkeit), unterschiedliche bodenchemische Bedingungen zwischen Stammablauf- und Zwischenstammgebieten (vorwiegend bei Buchen bzw. Ahornen), Lage im Relief (Luv- und Leeseite bezüglich der Hauptwindrichtung), Entfernung von Industriegebieten (Quellen des Säureeintrages) und Nutzungsgeschichte (Art und Dauer anthropogener Eingriffe in das Waldökosystem) zu nennen. In diesem Aufsatz steht eine allgemeine tonmineralogische und pedochemische Charakterisierung von Löß-Parabraunerden unter Wald südlich von Regensburg unter besonderer Berücksichtigung der Bestandesabhängigkeit (Fichtenbesatz und Buchenbesatz) im Mittelpunkt. Die Annahme einer stärkeren Bodenversauerung unter Koniferenbeständen beruht einerseits auf der vermehrten Produktion wasserlöslicher organischer Säuren beim Abbau der schwerer zersetzbaren Nadelstreu und andererseits auf einer erhöhten Säuredeposition durch stärkeres Auskämmen von Schadstoffen aus der Luft, das durch die insgesamt höhere Blattoberfläche und die ganzjährige Benadelung erklärbar ist. Die untersuchten Parabraunerden aus Löß geben ideale Möglichkeiten, bestandesabhängige Versauerungstendenzen zu untersuchen, da hier ein weitestgehend homogenes Ausgangssubstrat der Bodenbildung vorliegt. Neben pedochemischen Parametern stellen auch die Tonminerale einen sensiblen Zeiger für Veränderungen im Pedomilieu dar. Die Tonmineralentwicklung umfaßt die Prozesse der Bildung, Umwandlung und Zerstörung (TRIBUTH 1987, 1990). Dabei ist für die pedochemische Bildung der Tonminerale die Verwitterung der Glimmer am wichtigsten (BRONGER et al. 1974), wobei nach BRONGER & KALK (1976) allerdings ein wesentlicher Teil der Montmorillonite Neubildungen aus den Zerfallsprodukten der Feldspäte darstellt. Hinsichtlich der Tonmineralumwandlung in Böden bestehen unterschiedliche Anschauungen, die die methodischen und materialbedingten Probleme

bei der Interpretation dieser Vorgänge zeigen (JASMUND (ed.) 1976). Ein für alle Böden zutreffendes Umwandlungsschema existiert dabei nicht (TRIBUTH 1976). Während TRIBUTH in Löß-Parabraunerden von einer Entwicklungsabfolge Illit-Vermiculit-Smectit ausgeht, spricht NIEDERBUDE (1975, 1976) von einer Illitisation. Als erste wichtige Veränderung des Tonmineralbestandes in Zusammenhang mit fortschreitender Verwitterung und Bodenversauerung kann die Bildung sekundärer (Al-) Chlorite verstanden werden. Als Entstehungsbedingungen werden für sekundäre Chlorite pH-Werte von 6 bis 5 angegeben (BLUM 1976). Die Erhaltungsbedingungen liegen im pH-Bereich von 5 bis 4,5. Die Rolle höherer Anteile organischer Substanz hinsichtlich der Bildung sekundärer Chlorite wird dabei abweichend als unbedeutend oder chloritisierungshemmend bezeichnet. NIEDERBUDE & SCHWERTMANN (1980) zufolge stammen die sekundären Chlorite saurer Böden vorwiegend aus dioktaedrischen Vermiculiten. Bei chloritisierten Vermiculiten liegt meist eine randliche Anordnung der Al- (Fe-) Hydroxo-Komplexe vor ("Atollstruktur" nach DIXON & JACKSON 1962), während bei chloritisierten Smectiten eine gleichmäßige Anordnung dieser Komplexe in der Zwischenschicht dominiert (BARNHISEL & BERTSCH 1989). Nach KOZAK & HUANG (1971) stellt die randliche Anordnung dabei einen geringeren Chloritisierungsgrad dar, verbunden mit einer geringeren Hitzestabilität. NIEDERBUDE & RÜHLICKE (1981) konnten zeigen, daß sich sekundäre Chlorite durch Kalkung wieder in stabile, quellfähige Dreischichtminerale umwandeln lassen, während ein Überschreiten dieses sekundären Chloritstadiums zu einer irreversiblen Veränderung der Tonminerale führt (VEERHOFF & BRÜMMER 1989). Es erfolgt damit eine Dechloritisierung, die in extrem versauerten Horizonten zu quellfähigen Tonmineralen mit teilweise sehr starken Aufweitungerscheinungen führen kann (VEERHOFF 1992). Parallel dazu kommt es zu einer verstärkten Tonzerstörung mit der Bildung röntgenamorpher Substanzen (RAMPAZZO 1991). Es wird der Frage nachgegangen, inwieweit in den hier untersuchten Parabraunerden Prozesse der sekundären Chloritisierung und der Dechloritisierung sowie der Bildung röntgenamorpher Substanzen nachgewiesen werden können. Speziellere Untersuchungen zur kleinräumigen Differenzierung der Bodenversauerung (Stammablaufbereiche - Zwischenstammgebiete) mit einer Subfraktionierung und semiquantitativen Auswertung der Tonfraktion liegen im Untersuchungsgebiet von DOBLER & VÖLKE (1994) vor. Ergebnisse zur Tonmineralentwicklung in stark versauerten Böden des angrenzenden Mittelgebirgsraumes, des Bayerischen Waldes, im Vergleich zu den hier aufgeführten Löß-Parabraunerden stellt VÖLKE (1993, 1994) vor.

2 Untersuchungsgebiete

Die Untersuchungsgebiete liegen etwa 5 km (Weintinger Holz) bzw. 20 km (Hagelstadter Forst) südlich von Regensburg und gehören zu den Besitztümern des Fürstlichen Hauses Thurn und Taxis. Diese Wälder unterlagen keiner bekannten Rodungsphase. Allerdings ist nicht bekannt, wie intensiv hier eine Streunutzung in den vergangenen Jahrhunderten durchgeführt wurde. Hinsichtlich der Einteilung nach Lößprovinzen liegen die Untersuchungsgebiete im "Trockenen Nördlichen Fazies-Bezirk" der südbayerischen Löss (BRUNNACKER 1957). Das Jahresmittel der Lufttemperatur beträgt ca. 8°C, das Mittel der jährlichen Niederschläge etwa 650 mm (EIMERN 1975, für die Periode 1931-1960).

3 Material und Methoden

Die untersuchten Parabraunerden haben sich aus (Würm-)Lössen entwickelt. Sie weisen eine A(e)h/Ah-Al-Bt-ICcv-Horizontabfolge auf und zeigen eine ca. 1m mächtige Entwicklungstiefe. Der A(e)h-Horizont ist feldbodenkundlich nur unter Fichtenbesatz in Form einer leichten, angedeuteten Violetstichigkeit ansprechbar. Allerdings ermittelt sich

laboranalytisch aus dem Tiefenverlauf des oxalatlöslichen Eisens eine fast ubiquitäre Krypto-Podsolierung, da die Fe_0 -Werte in den A(e)h-Horizonten leicht unter denen der Al-Horizonte liegen (KUSSMAUL 1969). Die Al-Horizonte sind durchschnittlich 25-30 cm mächtig und erscheinen gegenüber den Bt-Horizonten etwas verkürzt und unterlagen vermutlich bereits Erosionsprozessen. Während der Tongehalt in den Al-Horizonten bei etwa 15% liegt, beträgt er in den Tonanreicherungs-horizonten ca. 40% und im carbonathaltigem Löß 20-25%. Der Karbonatgehalt des (Würm-)Lösses liegt bei den hier untersuchten Parabraunerden zwischen 20 und 30%, bei anderen Profilen (DOBLER & VÖLKELE 1994) auch höher. Pseudovergleyung tritt nur untergeordnet auf und hat keine profilprägende Wirkung. Schichtung konnte in keinem der untersuchten Profile festgestellt werden, so daß von annähernd identischen Ausgangsbedingungen für die Pedogenese ausgegangen werden kann. Eine genaue Beschreibung der untersuchten Profile findet sich bei NILLER (1993).

Bodenphysikalische und bodenchemische Analysen:

Korngrößenanalyse am nicht carbonat- und humuszerstörten Feinboden nach kombiniertem Sieb- und Schlämmerfahren nach Köhn (SCHLICHTING & BLUME 1966), pH-Wert ($CaCl_2$ und H_2O) in einer 1:2.5 Suspension, organischer Kohlenstoff in Veraschung mit schwefelsaurem Kaliumdichromat (Springer und Klee), Gesamtstickstoffgehalt mit Titration von Ammoniumborat gegen Salzsäure, Carbonatgehalt gasvolumetrisch nach Scheibler (LESER 1977); effektive Kationenaustauschkapazität mit 1M NH_4Cl nach MEIWES et al. (1984).

Extraktion der dithionitlöslichen Fraktion von Fe, Al, und Mn mittels DCB nach MEHRA & JACKSON (1960), der oxalatlöslichen Fraktion (mit NH_4 -Oxalat) nach SCHWERTMANN (1964), jeweils am Feinboden; der NaOH-löslichen Si- und Al-Oxide und Hydroxide nach HASHIMOTO & JACKSON (1960) an der Tonfraktion.

Tonmineralogische Untersuchungen:

Gewinnung der Fraktion $< 2 \mu m$ nach TANNER & JACKSON (1947), Zerstörung der organischen Substanz mit 6%-iger H_2O_2 , der Carbonate durch 5%-ige HCl bei pH-Kontrolle und der oxidischen Bindemittel mit DCB (MEHRA & JACKSON 1960); Belegung der Tonfraktion mit 0.5 M $MgCl_2$; Mg-Präparate, Weitung in der Ethylenglykolatmosphäre, Kaliumbelegung, Temperung (110,200,250,300,350,400,550°C) der kaliumbelegten Präparate, Weitung kaliumbelegter Präparate, DMSO-Belegung. Messung der Texturpräparate auf Glasobjektträgern mit dem Röntgendiffraktometer D 5000 (Siemens), ($Cu_{K\alpha}$, 40mA/40kV, Theta/2Theta, Automatische Divergenz-Spalt-Steuerung (ADSS), Sekundär-Monochromator; normal coupled step drive, step scan, step time 2,0 sec., step size 0,050°, keine Probenrotation, Messung von 2-32 Grad 2 Theta).

4 Ergebnisse

Die bodenchemischen Parameter zeigen für die untersuchten Parabraunerden eine sehr starke Versauerung der Oberböden mit pH (H_2O)-Werten von bis zu unter 3,5. Erwartungsgemäß werden unter Nadelwaldbestockung in den humosen Oberböden tiefere Werte festgestellt. Unter Nadelwald liegen die durchschnittlichen pH (H_2O)-Werte der A(e)h- bzw. Ah-Horizonte bei 3,5, unter Laubwald bei 4,4. Diese Werte sind durchaus jenen ähnlich, die von Mittelgebirgsböden aus basenarmen Ausgangssubstraten bekannt (SÜSSER 1987, HOFMANN-SCHIELLE 1988, VÖLKELE 1993), aber auch für Löß-Parabraunerden des Kraichgaus dokumentiert sind (WEBER 1990). Neben den bestandesabhängigen unterschiedlichen pH-Werten der Oberböden ist in den untersuchten Profilen auch ein charakteristischer, mit der Bestockung in Zusammenhang zu bringender Tiefenverlauf zu beobachten. Während sich unter Nadelwald die tiefsten pH-Werte im humosen Oberboden zeigen, treten sie unter Laubwald erst in den obersten Bereichen des

Lessivierungshorizontes auf. Charakteristische Bestandesabhängigkeiten zeigen sich auch bezüglich des Basensättigungsgrades, wovon wiederum am aussagekräftigsten die humosen Oberböden betroffen sind. Hier werden unter Laubwaldbeständen Basensättigungsgrade von 50% und mehr erreicht, während sie unter Nadelwald maximal 15% erreichen (Fig. 1). Damit bestätigt sich die Funktion der Laubstreu als Basenpumpe. Ebenso kann in den humosen Oberböden der Nadelwaldstandorte austauschbares Eisen festgestellt werden, wobei die Anteile an der effektiven Kationenaustauschkapazität 5% nicht überschreiten. In den Lessivierungshorizonten gehen die bestandesabhängigen Differenzen zurück, wobei der Anteil austauschbarer Alkali- und Erdalkalitionen hier bestandesunabhängig geringer ist als in den humosen A-Horizonten. Die Basensättigung liegt in den Al-Horizonten regelhaft unter 10%. Insgesamt weisen die Lessivierungshorizonte eine geringe Elastizität auf (MEIWES et al. 1984). Der überwiegende Teil der A-Horizonte der untersuchten Parabraunerden befindet sich nach Anwendung des Konzeptes der Puffersysteme von ULRICH et al. (1979) im Eisen/Aluminium bzw. im Aluminium-Pufferbereich (Fig. 2). VÖLKELE & NILLER (1993) stellen eine Differenzierung der Pufferbereiche in verschiedenen Tiefenstufen vor und können vereinzelt bis in die Tiefenstufe von 40-60 cm ein Vordringen des Eisen/Aluminium-Pufferbereichs belegen. Die Versauerungsfront nach ULRICH & MALESSA (1989) ist in den untersuchten Profilen gut nachzuweisen und liegt in einer durchschnittlichen Tiefe von 50 cm (Fig. 1). Wie die Vergleiche mit Böden der angrenzenden Mittelgebirgsregionen zeigen, wird der substratbedingte chemische Bodenzustand von Versauerungsvorgängen großenteils überlagert. Dabei zeigt der Tiefengradient der austauschbaren Kationen auf den Löß-Standorten eine stärkere Ausprägung. Profilmorphologisch sind unter Nadelwald ungünstigere Humusformen (es dominiert Typischer, feinhumusarmer Moder) feststellbar als unter Laubwald (mullartiger Moder), die auf geringere bodenbiologische Aktivität unter Nadelwald hinweisen.

Die unterschiedlichen Fraktionen des Aluminiums, Eisens, Mangans und Siliziums können als weitere Parameter für die Abschätzung der Verwitterungsintensität herangezogen werden. Die dithionitlösliche Fraktion des Eisens zeichnet die Tonverlagerung und damit die Parabraunerdedynamik nach, der Tiefenverlauf der oxalatlöslichen Eisenfraktion zeigt für alle Nadelwaldprofile und einige Laubwaldprofile Krypto-Podsolierung an (ULRICH 1981), die nur in den Nadelwaldprofilen auch profilmorphologisch zu fassen ist. Im stärksten versauerten Nadelwaldprofil mit einem pH ($CaCl_2$)-Wert von 2,7 im A(e)h-Horizont konnte in der Tonfraktion eine extreme Anreicherung NaOH-extrahierbaren Siliziums bei starken Verlusten NaOH-extrahierbarem Aluminiums festgestellt werden (Fig. 3). Dies drückt sich auch im entsprechend weiten Molverhältnis SiO_2/Al_2O_3 aus. Ähnliche Anreicherungen NaOH-extrahierbaren Siliziums, als Maß für die Bildung amorpher Verbindungen, stellen auch FRANK & GEBHARDT (1989) sowie VEERHOFF (1992) fest.

Tonmineralogisch treten in allen Profilen Illit, Kaolinit, unregelmäßige Wechsellagerungsminerale (meist Illit und quellfähige 14Å-Minerale), hochgeladene, nicht quellfähige Vermiculite, sekundäre Chlorite und quellfähige 14Å-Minerale auf. Für die Fragestellung ausreichend wurden dabei alle 7Å-Reflexe dem Kaolinit zugeordnet und keine weitere Differenzierung in Kaolinit, Dickit und Nacrit vorgenommen. Der Kaolinit-Nachweis erfolgte mittels DMSO (LAGALY 1991). Der Halloysit-Nachweis mit DMSO und 8 maligem Nachwaschen mit H_2O verlief durchweg negativ.

Die hier unter Kaolinit zusammengefaßten 7Å-Minerale zeigen eine geringe Hitzestabilität und lassen damit auf relativ ungeordnete Strukturen dieser kaolinitischen Minerale schließen, da die völlige Dehydratisierung eines gut geordneten Kaolinites erst in einem Temperaturbereich von 550-570°C erfolgt (BRINDLEY & BROWN 1980). Die nachgewiesenen Kaolinite weisen vermutlich unterschiedliche Kristallinitätsgrade auf (disordered kaolinite) oder zeigen Übergänge zu einem Meta-Kaolinit (BRINDLEY & BROWN 1980). Eine relativ einfache Methode zur Differenzierung smectitischer Minerale von niedrig geladenen, dioktaedrischen Vermiculiten, die in der Ethylenglykolatmosphäre ein ähnliches Quellungsverhalten zeigen, besteht in der Quellung der kaliumbelegten Präparate. Smectite müßten sich bei diesem Verfahren auf 17Å aufweiten lassen, während Vermiculite nur Aufweitungen auf 14Å zeigen sollten (VEERHOFF 1992). In

den vorliegenden Fällen können dabei überwiegend nur erneute Aufweitungen auf 14Å beobachtet werden, was zusammen mit der Betrachtung der Hitzestabilität der sekundären Chlorite einen hohen Anteil niedrig geladener dioktaedrischer Vermiculite an der quellfähigen Komponente des Tonmineralsspektrums wahrscheinlich macht. Da der Nachweis jedoch nicht mit Sicherheit zu führen ist, wird im weiteren nur von quellfähigen Dreischichttonmineralen die Rede sein. Dabei nimmt der Anteil dieser quellfähigen Tonminerale grundsätzlich in den untersuchten Profilen von unten nach oben ab. In den am stärksten versauerten humosen Oberböden treten allerdings, nach einem Ausfall in den Lessivierungshorizonten wiederum quellfähige Komponenten in die Spektren ein, die im Diffraktogramm des ethylenglykolgeweiteten Präparates ein diffuses Interferenzband zwischen 15Å und 17Å (Fig. 4) erzeugen. Da Illit und Kaolinit in den Profilen keine eindeutige Tiefenfunktion aufweisen, die Anteile der sekundären Chlorite aber rückläufig sind, ist davon auszugehen, daß sich diese neugebildeten, erneut aufweitbaren Dreischichtminerale durch Lösung der Al-Hydroxo-Komplexe aus den Zwischenschichten der sekundären Chlorite gebildet haben. Nach BLUM (1976) sind in diesen Horizonten bereits die Auflösungsbedingungen für sekundäre Chlorite gegeben. Im Gegensatz zu Untersuchungen von VEERHOFF (1992) oder RAMPAZZO (1991) sind jedoch in den hier untersuchten Profilen keine Aufweitungen der Schichtabstände auf > 20Å festzustellen. Ähnliche Befunde, also die Bildung extrem aufweiterbarer Dreischichtminerale in den am stärksten versauerten humosen Oberböden schildert VÖLKELE (1993) aus dem Bayerischen Wald. Es ist dabei jedoch ein charakteristischer Unterschied zu den untersuchten Löß-Parabraunerden festzustellen, da bei diesen noch keine extrem starke Dechloritisierung in den Oberböden beobachtet werden kann. Allerdings kann nicht geklärt werden, ob in den humosen Oberböden aufgrund der möglicherweise chloritisierungshemmenden Wirkung organischer Substanz überhaupt verstärkt pedogene sekundäre Chlorite gebildet wurden. Die Dechloritisierung hin zu wiederum quellfähigen Tonmineralen wird normalerweise von Tonzerstörung, also Bildung röntgenamorpher Substanz, begleitet, die sich nach VEERHOFF & BRÜMMER (1991) durch Matrixeffekte im Bereich zwischen 3,2 und 4,6Å auszeichnen können. Dies kann in den untersuchten Proben nicht mit Sicherheit nachgewiesen werden. Auffällig ist nur eine Abnahme der Reflexintensitäten in den humosen A-Horizonten im Vergleich zu jenen Horizonten, die diese neu gebildeten Dreischichtminerale nicht aufweisen. Dabei kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, daß hier eventuell nicht vollständig oxidierte organische Substanz zu einer Untergrundmaskierung und damit zu einer Reduzierung der Reflexintensitäten führt. Eine Kaolinit-Neubildung im extrem sauren Milieu, wie sie von BURCKHARDT (1988) in Laborversuchen nachgewiesen werden konnte, ist in den untersuchten Profile nicht feststellbar. Das Maximum der sekundären Chloritisierung liegt in diesen stark versauerten Profilen demzufolge nicht in den humosen Oberböden, sondern in den Lessivierungshorizonten, obgleich auch hier bereits teilweise die Erhaltungsbedingungen für sekundäre Chlorite nicht mehr gegeben sind. Die Abgrenzung sekundärer (pedogener) Chlorite von primären (lithogenen) Chloriten wird mittels der Erhitzung kaliumbelegter Präparate geführt. Während primäre Chlorite eine hohe Hitzestabilität aufweisen und bei 550°C im Röntgendiffraktogramm einen scharfen 14Å-Reflex ausbilden, sind sekundäre Chlorite je nach Ausprägung der Zwischenschichtbelegung in unterschiedlichem Maße als temperungsinstabil zu betrachten. Bei den vorliegenden Profilen zeigen die nicht kontraktionsfähigen Chlorite eine sehr geringe Hitzestabilität, da der 14Å-Reflex bereits bei Temperaturen von 300°C und weniger ausfällt. Nach BARNHISEL & BERTSCH (1989) ist dann von einer randlichen Anordnung der Al-Hydroxo-Komplexe in den Zwischenschichten auszugehen, die für chloritisierte Vermiculite spricht (KOZAK & HUANG 1971). Dies steht in Übereinstimmung mit den Erkenntnissen von NIEDERBUDE & SCHWERTMANN (1980). Mit der Blockierung der Zwischenschichten aufweiterbarer Tonminerale infolge der pedogenen Chloritisierung nimmt auch die Kationenaustauschkapazität entsprechend ab. Am stärksten betroffen sind wiederum die Lessivierungshorizonte der untersuchten Parabraunerden, so daß hier teilweise die Werte der effektiven Kationenaustauschkapazität unter 5 mval/100g liegen, ein weiterer Beleg für die "ökologische Benachteiligung" der Al-Horizonte. Neben Horizonten, in denen sekundäre Chlorite und quellfähige Dreischichtminerale gemeinsam auftreten, überwiegend in AlBt-Horizonten, lassen

sich in den tiefer gelegenen Teilen der Bt-Horizonte keine sekundären Chlorite mehr nachweisen. Das verstärkte Auftreten quellfähiger Tonminerale mit zunehmender Tiefe fällt mit einem Anstieg sowohl des pH-Wertes als auch der effektiven Kationenaustauschkapazität zusammen. So läßt sich innerhalb der Bt-Horizonte trotz zur Tiefe hin abnehmender Tongehalte dort eine erhöhte effektive Kationenaustauschkapazität feststellen, die die starke qualitative Veränderung der Tonmineralzusammensetzung mit der Tiefe und deren ökologische Relevanz bestätigen. Die tiefenabhängige Veränderung der Tonmineralgarnitur ist demnach gut mit den bodenchemischen Daten zu korrelieren.

Insgesamt konnte im Untersuchungsgebiet eine starke Degradierung der Waldböden, besonders der A-Horizonte beobachtet werden. Eine Bestandesabhängigkeit der Bodenversauerung ist gut zu belegen, allerdings eindeutiger mit pedochemischen als mit tonmineralogischen Analysen. Hier zeigt sich wohl doch ein gewisser Verzögerungseffekt bei der Umwandlung und Degradierung der Tonminerale, was ebenfalls als ein Hinweis auf die aktuelle Wirksamkeit der an der Bodenversauerung beteiligten Prozesse gedeutet werden kann.

Aus ökologischer Sicht ist es erforderlich, den pH-Wert in den Oberböden in einem Bereich zu halten, der zumindest eine irreversible Degradierung der Tonminerale, wie sie nach VEERHOFF & BRÜMMER (1989) mit der Auflösung sekundärer Chlorite bereits gegeben ist, unterbindet.

5 Zusammenfassende Bemerkungen

Der Versauerungsgrad von Parabraunerden im Lößgebiet südlich von Regensburg wird anhand tonmineralogischer und pedochemischer Parameter dokumentiert. Aufgrund der Homogenität des Ausgangssubstrates der Bodenbildung können bestandesabhängige Tendenzen der Versauerung festgestellt werden. Die humosen Oberböden der Nadelwaldstandorte zeigen niedrigere pH-Werte, höhere Anteile austauschbaren Eisens, z.T. Anreicherung amorpher Si-Oxide und bereits regelhafte Krypto-Podsolierung. Bestandesunabhängig befindet sich ein Großteil der A-Horizonte bereits im Eisen/Aluminium- bzw. Aluminium-Pufferbereich. Alle Profile zeichnen sich durch eine Versauerungsfront in durchschnittlich 50 cm Tiefe aus. Tonmineralogisch ist in den A(e)h-Horizonten ansatzweise eine Auflösung sekundärer Al-Chlorite nachzuweisen, die sich in der Bildung erneut quellfähiger Dreischichtminerale belegen läßt. Der maximale Anteil der sekundären Chlorite, die sich aller Wahrscheinlichkeit nach aus Vermiculiten gebildet haben, liegt in den Lessivierungshorizonten der untersuchten Parabraunerden. Aufgrund ihrer geringen Humus- und Tongehalte sowie der qualitativen und quantitativen Zusammensetzung der Tonfraktion und der damit verbundenen geringen Sorptionskapazität sind die Lessivierungshorizonte durch eine starke ökologische Benachteiligung gekennzeichnet.

Im Vergleich zu den Böden des angrenzenden Mittelgebirgsraumes werden in den Oberböden bereits ähnlich tiefe pH-Werte festgestellt. Allerdings zeigen andere bodenchemische Parameter eine noch vergleichsweise bessere ökologische Ausstattung. Die in den A-Horizonten der Mittelgebirgsböden festgestellten, extrem aufweiterbaren Dreischichtminerale treten in den Löß-Parabraunerden noch nicht auf. Trotz des gut gepufferten Ausgangssubstrates ist auch im Lößgebiet ein weit fortgeschrittenes Aziditätsmilieu festzustellen, daß bereits ansatzweise zu einer irreversiblen Degradierung der Tonminerale in den humosen Oberböden geführt hat. Der Einfluß des Bestandes auf die Intensität der Versauerung ist zweifelsfrei nachweisbar, zeigt sich in den pedochemischen Daten jedoch eindeutiger als in den tonmineralogischen.

6 Literatur

- Barnhisel, R.J., Bertsch, P.M. 1989: Chlorites and hydroxy-interlayered vermiculite and smectite. - Dixon, J.B. & Wilson, S.B. (eds.): Minerals in soil environments (2nd Ed.). - SSSA Book Series 1, Madison (Wisc.): 729-788.
- Blum, W., 1976: Bildung sekundärer Al- (Fe-) Chlorite. - Z. Pflanzenern. Bodenk. 139, 107-125.

- Brindley, G.W., Brown, G., 1980: Crystal structures of clay minerals and their x-ray-identification. - Mineralogical Society, Monograph No 5, 495 S.
- Bronger, A., Kalk, E., 1976: Zur Feldspaterwitterung und ihrer Bedeutung für die Tonmineralbildung. - Z. Pflanzenern. Bodenk. 1976,1, 37-55.
- Bronger, A., Kalk, E., Schröder, D., 1974: Zur Silikaterwitterung sowie Entstehung und Umwandlung von Tonmineralen in Lößböden. - Mitt. Dtsch. Bodenk. Ges. 18,394-401.
- Brunnacker, K., 1957: Die Geschichte der Böden im jüngeren Pleistozän in Bayern. - Geologica Bavarica 34, 1-95
- Burckhardt, A.C., 1988: Untersuchungen zur Destabilisierung von Tonmineralen durch experimentelle Behandlung mit Säuren. - Karlsruher Geographische Hefte 17.
- Dixon, J.D., & Jackson, M.L., 1962: Properties of intergradient chlorite expansible layer silicates in soils. - Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 26, 358-362.
- Dobler, L. & Völkel, J., 1994: Veränderungen bodeneigener Tonminerale zwischen Stammablauf- und Zwischenstammabereich in einem Altholz auf Parabraunerden im Lößgebiet von Regensburg, in diesem Band.
- Eimern van, J., 1975: Klima. - Wittmann, O.: Erläuterungen zur Bodenkarte von Bayern 1:25000, Bl. Nr. 6938 Regensburg, 12-17.
- Frank, U. & Gebhardt, H., 1989: Mineralverwitterung, Tonmineralumwandlung und Tonzerstörung als Folge starker Bodenversauerung auf ausgewählten Waldstandorten. - Mitt. Dtsch. Bodenk. Ges. 59/II: 1163-1168.
- Hashimoto, I. & Jackson, M.L., 1960: Rapid dissolution of allophane and kaolinite-halloysite after dehydration. - Clays Clay Min. 7, 102-113.
- Hofmann-Schielle, C., 1988: Bodenkundliche Untersuchungen in den Hochlagen des Bayerischen Waldes unter besonderer Berücksichtigung des Mineralkörpers. - Diss. LMU München, 229 S.
- Jasmund, K. (ed.), 1976: Tonmineralogie - Bericht über ein von 1968-1973 gefördertes Schwerpunktprogramm, 147 S.
- Kozak, L.M., Huang, P.M., 1971: Adsorption of Hydroxy-Al by certain phyllosilicates and its relation to K/Ca cation exchange selectivity. Clays Clay Min. 19, 95-102.
- Kussmaul, H., 1969: Vergleich von Lößböden unter Laubwald und Acker. - Diss. LMU München.
- Lagaly, G., 1991: Erkennung und Identifizierung von Tonmineralen mit organischen Stoffen. - Tributh, H. & Lagaly, G. (eds.): Identifizierung und Charakterisierung von Tonmineralen. - Berichte der DTTG, 86-130.
- Leser, H., 1977: Feld- und Labormethoden der Geomorphologie, Berlin, 446 S.
- Mehra, O.P., Jackson, M.L., 1960: Iron oxide removal from soils and clays by dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. - Clays Clay Min. 7, 317-327.
- Meiwes, K.-J., König, N., Khanna, P.K., Prenzel, J. & Ulrich, B., 1984: Chemische Untersuchungsverfahren für Mineralboden, Auflagehumus und Wurzeln zur Charakterisierung und Bewertung der Versauerung von Waldböden. - Ber. d. Forschungszentrums Waldökosysteme/Waldsterben 7, 1-67.
- Niederbudde, E.A., 1975: Veränderungen von Dreischicht-Tonmineralen durch natives K in holozänen Lößböden Mitteldeutschlands und Niederbayerns. - Z. Pflanzenern. Bodenk. 1975, 217-234.
- Niederbudde, E.A., 1976: Umwandlung von Dreischichtsilikaten unter K-Abgabe und K-Aufnahme. - Z. Pflanzenern. Bodenk. 1976, 57-71.
- Niederbudde, E.A. & Rühlicke, G., 1981: Umwandlung von Al-Chloriten durch Kalkung. - Z. Pflanzenern. Bodenk. 144/2, 127-135.
- Niederbudde, E.A. & Schwertmann, U., 1980: Clay mineralogy of soils. - Geol. Jb. D39, 99-114.
- Niller, H.-P., 1993: Tonmineralogische und bodenchemische Untersuchungen zum Versauerungsgrad von Löß-Parabraunerden ausgewählter Waldstandorte südlich von Regensburg. - Dipl.-Arb., Lehrst. Phys. Geogr., Uni. Regensburg, 144 S.
- Rampazzo, N., 1991: Physikalisch-chemische und mineralogische Zustandsänderungen an Waldböden durch Luftimmission. - Diss. Univ. f. Bodenkultur, Wien 36, 159 S.
- Schlichting, E. & Blume, H.-P., 1966: Bodenkundliches Praktikum, 209 S.
- Schwertmann, U., 1964: Differenzierung der Eisenoxide des Bodens durch Extraktion mit Ammoniumoxalat-Lösung. - Z. Pflanzenern. Düng. Bodenk. 105, 194-202.
- Süsser, P., 1987: Art, Menge und Wirkungsweise der Puffersubstanzen in Mineralbodenhorizonten forstlich genutzter Böden des Fichtelgebirges. - Diss., TU München-Weihenstephan, 135 S.
- Tanner, G.B., Jackson, M.L., 1947: Nomographs of sedimentation times for soil particles under gravity or centrifugal acceleration. - Soil Sci Proc. 12, 60-65.
- Tributh, H., 1976: Die Umwandlung der glimmerartigen Schichtsilikate zu aufweitbaren Dreischichttonmineralen. - Z. Pflanzenern. Bodenk. 1976,1, 7-25.
- Tributh, H., 1987: Development of K containing minerals during weathering and suitable methods for their determination. - Proc. of the. 20th. Colloqu. Int. Potash Inst. Bern (Switzerland), 65-83.
- Tributh, H., 1990: Die Tonmineralentwicklung in Abhängigkeit von der Bodengenese. - Mitt. Dtsch. Bodenk. Ges. 62, 153-156.
- Ulrich, B., 1981: Ökologische Gruppierung von Böden nach ihrem chemischen Bodenzustand. - Z. Pflanzenern. Bodenk. 144, 289-305.
- Ulrich, B. & Malessa, V., 1989: Tiefengradienten der Bodenversauerung. - Z. Pflanzenern. Bodenk. 152, 81-84.
- Ulrich, B., Mayer, R. & Khanna, P.K., 1979: Deposition von Lufterunreinigungen und ihre Auswirkungen in Waldökosystemen im Solling. - Schriften Forstl. Fak. Univ. Göttingen und Niedersächs. FVA 59, 291 S.
- Veerhoff, M., 1992: Silicatverwitterung und Veränderung des Tonmineralbestandes als Folge von Versauerungsschüben. - Bonner Bodenkdl. Abh. 8, 249 S.
- Veerhoff, M., Brümmer, G.W., 1989: Silicatverwitterung und Tonmineralumwandlung in Waldböden als Folge von Versauerungsprozessen. - Mitt. Dtsch. Bodenk. Ges. 59/II, 1203-1208.
- Veerhoff, M., Brümmer, G.W. 1991: Mineralogische und chemische Charakterisierung von Abbauprodukten der Silicatverwitterung unter stark sauren Bedingungen. - Mitt. Dtsch. Bodenk. Ges. 66, 1123-1126.
- Völkel, J., 1993: Periglaziale Deckschichten und Böden im Bayerischen Wald und seinen Randgebieten als geogene Grundlagen landschaftsökologischer Forschung im Bereich naturnaher Waldstandorte. - Habilitationsschrift Universität Regensburg, 243 S. und Anhangband. (im Druck als Suppl.-Bd. Z. Geomorph N.F. 96).
- Völkel, J., 1994: Tonminerale in Waldböden des Mittelgebirgsraumes - Herkunft, versauerungsbedingte Transformation und ökologische Bedeutung (Fallbeispiel Bayerischer Wald) (in diesem Band).
- Völkel, J., Niller, H.-P., 1993: Bodenversauerung und Mineralveränderungen in Waldböden industriereifer Standorte SE-Bayerns. - Mitt. Dtsch. Bodenk. Ges. 72, 1419-1422.
- Weber, L., 1990: Untersuchungen zum Versauerungsgrad von Löß-Parabraunerden an ausgewählten Waldstandorten im Kraichgau. - Stuttgarter Geogr. Arb. 113, 168 S.

Fig. 1: Tiefenverlauf der austauschbaren Kationen und des pH-Wertes sowie Lage der Versauerungsfront. (7039-6 ist ein Laubwaldprofil, 7039-7 ein Nadelwaldprofil; die Kurve mit Na, K, Ca und Mg entspricht der Basensättigung).

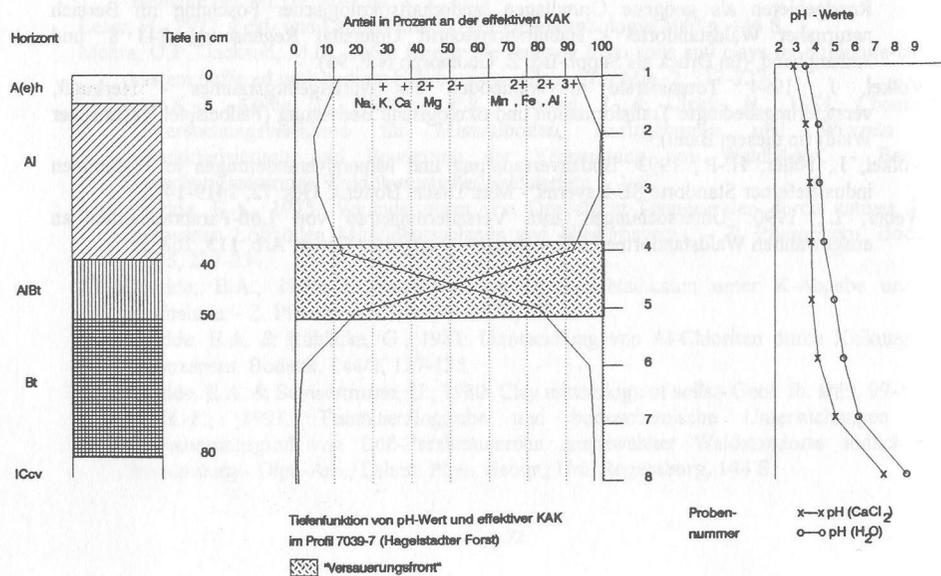
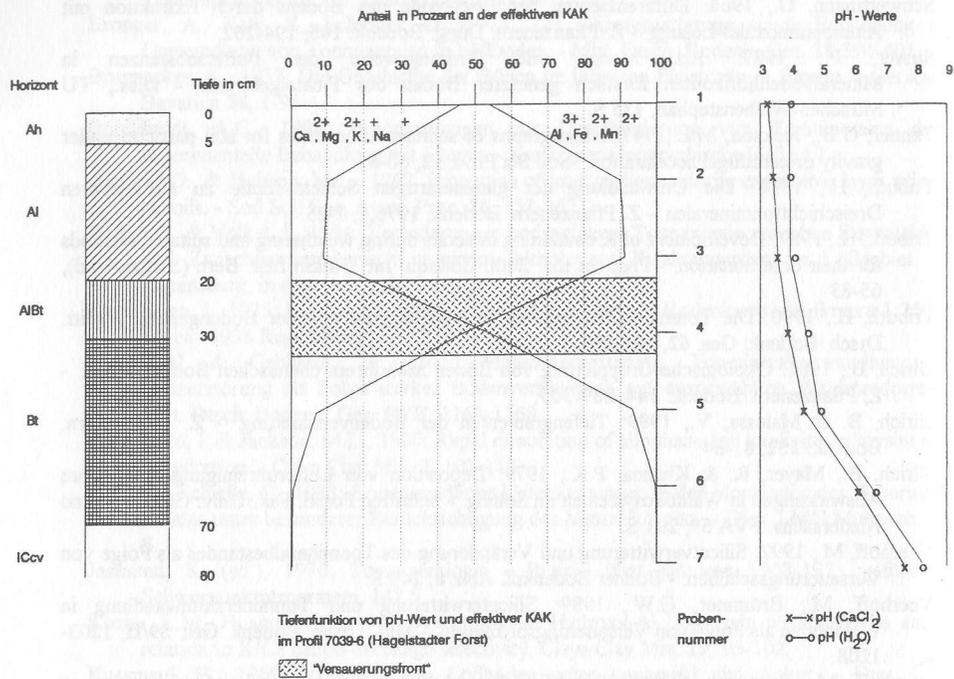


Fig. 2: Zuordnung der Bodenhorizonte zu Pufferbereichen

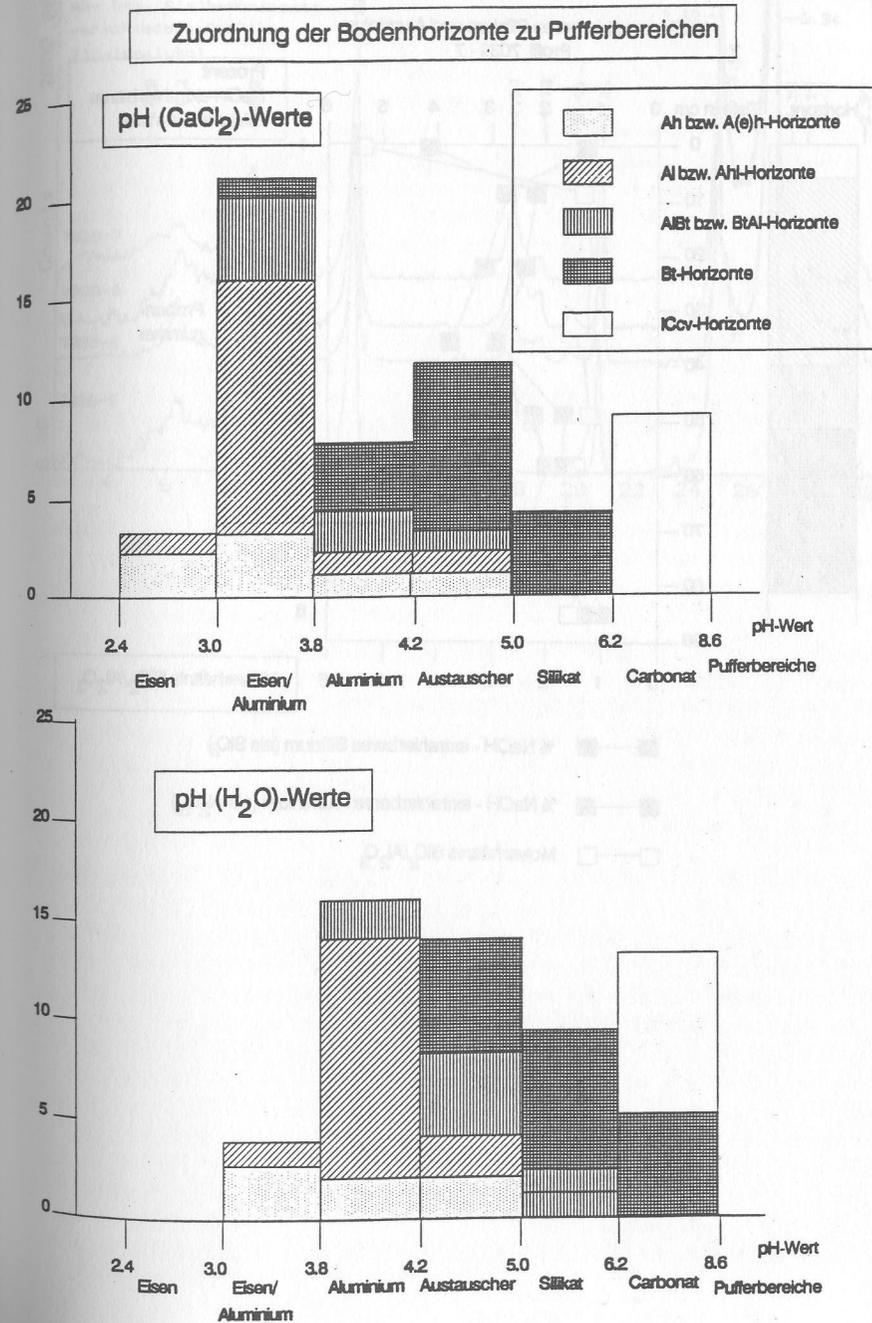


Fig. 3: Anreicherung NaOH-extrahierbaren Siliziums im Oberboden des am stärksten versauerten Nadelwaldprofils (7039-7).

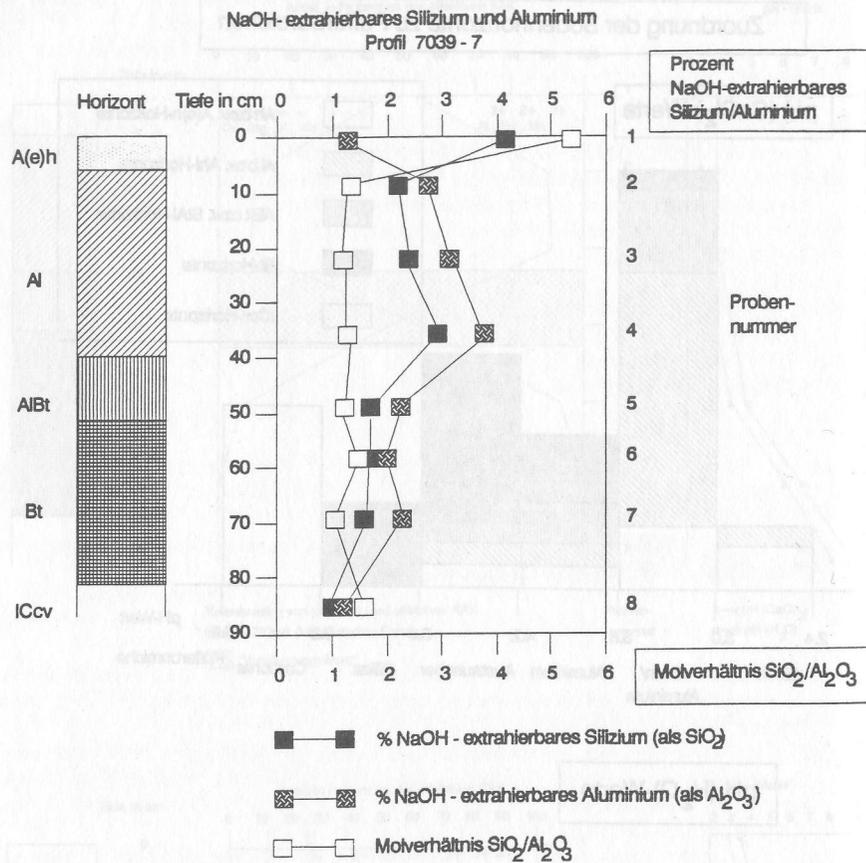


Fig. 4: Diffraktogramme ausgewählter Ah bzw. A(e)h-Horizonte (Ethylenglykolatmosphäre) (7038-8 und 7039-7 stellen Nadelwaldprofile dar, 7038-9 und 7039-6 Laubwaldprofile).

