

# Degradation, Regradation, Podsolierung und Depodsolierung

## Nutzungsbedingte Veränderungen der Sandböden im Nürnberger Reichswald

von

CARMEN REISSENWEBER und ANDREAS STÜTZER

mit 3 Abbildungen, 2 Photos und 2 Tabellen

### 1 Der Wandel des Reichswaldes vom Mischwald zum Nadelforst

„Steckerlaswald“ – diese Lokalbezeichnung für schwachwüchsige Kiefernbestände ist seit langem ein Synonym für weite Teile des Nürnberger Reichswaldes. Die Waldkiefer (*Pinus sylvestris*) war im Reichswald jedoch nicht immer so dominant wie heute; noch in der frühen Neuzeit waren hier vielerorts Laub- oder Mischwälder anzutreffen (OTT-ESCHKE 1951, 1952). Die zunehmende Nachfrage nach dem Rohstoff Holz und die daraus resultierende Bevorzugung der schnellwüchsigen und anspruchslosen Kiefer gegenüber den Laubhölzern haben allerdings dazu geführt, dass die Laubbäume fast vollständig verdrängt wurden. Während der ursprüngliche Anteil der Kiefer am Gesamtbestand auf maximal 30% geschätzt wird (SPERBER 1968), liegt er heute bei rund 80% (Mitteilung des Forstamtes Erlangen).

Der Siegeszug der Kiefer begann mit der Erfindung der Nadelbaumsaat durch den Nürnberger Patrizier Peter Stromer im Jahr 1368 (SPORHAN-KREMPPEL und STROMER 1969). Der Umbau vom Misch- zum Nadelwald vollzog sich in den ersten Jahrhunderten nach Stromers Erfindung allerdings noch relativ langsam. Zu Beginn der Neuzeit hatte der Anteil der Nadelbäume am Gesamtbestand des Reichswaldes etwa 50% erreicht (BRUNNER 1992). Auf den damaligen Mischwaldcharakter weisen sowohl pollenanalytische Befunde (OTT-ESCHKE 1952) als auch verschiedene bildhafte Dokumente hin (SPERBER 1968; *Erlanger Bausteine* 1992). Auch die zahlreichen Belege für die noch im 18. Jahrhundert betriebene Schweinemast sind ein – wenn auch nicht unumstrittenes – Indiz für den bis in die Neuzeit erheblichen Laubbaumanteil des Reichswaldes (OTT-ESCHKE 1951, vgl. HORNDASCH 1962).

Massive Verschiebungen zugunsten der Kiefer hat es hingegen mit der Übernahme des Reichswaldes durch den Bayerischen Staat im Jahr 1806 gegeben, der die Ablösung der Weiderechte und die Wiederaufforstung der oftmals stark aufgelichteten Waldweideflächen mit der Kiefer vorantrieb, die sich als anspruchslose, lichtbedürftige und forstharte Baumart dafür geradezu anbot. Bei der Forstinventur des Jahres 1830 machte der Nadelbaumanteil bereits 93% der gesamten Waldfläche aus. Die Veränderungen im frühen 19. Jahrhundert wurden von HORNDASCH (1962) aus

diesem Grund zu Recht als die gravierendsten in der Geschichte des Reichswaldes bezeichnet. Aus waldbaulicher Sicht sind die Aufforstungen der damaligen Zeit - wie auch später diejenigen nach der großen Kiefernspannerkalamität 1893/96 - hingegen ohne Zweifel als Pioniertaten zu bewerten, auch wenn damit erhebliche, aber kaum vermeidbare Eingriffe in die Böden verbunden waren (mündl. Mitteilung Dr. Knorr, Forstamt Erlangen).

Stellenweise war die Kiefer allerdings auch schon vor Stromers Zeiten bestandsbildend im Reichswald vertreten. Da sie im mitteleuropäischen Laubwaldklima relativ konkurrenzschwach ist, blieb ihre natürliche Verbreitung jedoch überwiegend auf Standorte beschränkt, die für andere Gehölzpflanzen zu dürftige Nährstoff- und Wasserangebote aufweisen. Dazu gehören vor allem die Dünen, die im nördlichen (=Sebalder) Reichswald meist kleinflächig, im südlichen (=Lorenzer) Reichswald auch großflächig vorkommen (BERGER 1951; HABBE 1997). Außerdem müssen hierzu jene Teile der im gesamten Reichswald weit verbreiteten Flugsandfelder gerechnet werden, in denen der Grundwasserspiegel weit unterhalb der Geländeoberfläche liegt. In den Flugsandfeldern war die Kiefer allerdings selten die absolut dominierende Baumart. Hier haben ursprünglich zumeist Mischwälder gestanden, in denen neben der Kiefer vor allem der Stieleiche (*Quercus robur*) eine zentrale Bedeutung zukam (VOGTHERR 1952; HOHENESTER 1978).

## 2 Die Auswirkungen des Bestandwandels auf die Böden

Der zu Beginn des 19. Jahrhunderts massiv einsetzende Umbau vom Mischwald zum Nadelforst blieb nicht ohne Einfluss auf die Böden. Hauptverursacher der Bodenveränderungen war die Nadelstreu. Weil Nadeln an basenarmen Standorten von Bodenorganismen kaum abgebaut werden, bildeten sich im Gegensatz zum Mull- oder Moderhumus der vormaligen Laub- und Mischwaldstandorte nun Rohhumusaufgaben, deren hoher Gehalt wanderungsfähiger organischer Verbindungen eine Versauerung der mineralischen Horizonte, den Verlust von Nährstoffen durch Auswaschung (=Degradation) sowie die Verlagerung von Aluminium und Eisen in tiefere Bodenschichten (=Podsolierung) zur Folge hatte. Aus den vormals schwach entwickelten Sandböden, bei denen es sich typologisch um Regosole oder Braunerden handelte, wurden dadurch Podsole. Zwar ist Podsolierung unter sehr ungünstigen bodenklimatischen und wasserhaushaltlichen Verhältnissen gelegentlich auch in Laub- und Mischwäldern feststellbar, doch ist dies bei weitem nicht mit der Situation in Nadelwäldern zu vergleichen. Selbst in Mischwäldern sind in der Regel allenfalls initiale Formen von Stoffverlagerungen nachweisbar, die in der deutschen Bodensystematik aufgrund der schwachen Merkmalsausprägung zu Recht nur als Varietät mit der Bezeichnung ‚Podsoligkeit‘ eingestuft werden (*Ad hoc AG Bodenkunde* 1994, von ZEJSCHWITZ 1979). Eine solch schwache Merkmalsausprägung kann auch für den ursprünglichen Zustand der meisten Böden im Reichswald angenommen werden. Anders ist die Situation hingegen dort, wo die Kiefer bereits vor den Aufforstungen

dominant war, also vor allem auf den Dünen. Hier sind vielfach tiefgründig ausgelagte Böden mit Bleichhorizonten von mehreren Dezimetern Mächtigkeit anzutreffen (ROSSNER 1990), bei denen es sich im Gegensatz zu den vom Menschen initiierten Degradationen um Primärentwicklungen handelt.

Auch der Beginn der vom Menschen verursachten Bodendegradation reicht bis vor die Zeit Stromers zurück. Die exploitative mittelalterliche Bewirtschaftung der Wälder, der Stromer durch die Nadelbaumsaat Einhalt gebieten wollte, hatte zur Ausbreitung zwergstrauchreicher Ersatzgesellschaften aus Heidelbeere (*Vaccinium myrtillus*), Preiselbeere (*Vaccinium vitis-idaea*) und Besenheide (*Calluna vulgaris*) geführt, die heute noch dominante Bodendecker in weiten Teilen des Reichswaldes sind. Wie Nadelbäume produzieren sie schwer abbaubare, saure Streu. Dennoch dürften die negativen Auswirkungen auf die Böden im Mittelalter und in der frühen Neuzeit weniger massiv als in den letzten zwei Jahrhunderten gewesen sein. Dafür spricht, dass Podsolierungen unter Zwergsträuchern aufgrund der geringeren Streuproduktion üblicherweise schwächer ausgeprägt sind als in Nadelforsten und dass die Aufforstungen anfangs nicht so systematisch betrieben wurden, wie das ab dem 19. Jahrhundert unter modernen forstwissenschaftlichen Gesichtspunkten der Fall war. Die Entwicklung seit dem Mittelalter hat jedoch die Voraussetzungen für die anschließenden, rasch ablaufenden Veränderungen geschaffen.

Die Auswirkungen, die die Umstrukturierungen seit dem Beginn des 19. Jahrhunderts auf die Böden hatten, waren zweifacher Art und lassen sich zugleich in zwei Phasen einteilen. Die erste Phase dauerte etwa bis zum Beginn des 20. Jahrhunderts, vereinzelt sogar bis in die 50er Jahre des 20. Jahrhunderts. Sie ist durch eine weitere Nebennutzung des Waldes gekennzeichnet: das Streurechen. Dieses Verfahren, die organischen Auflagen zu entfernen, um sie als Stalleinstreu zu verwenden, war notwendig geworden, nachdem die Waldweide zugunsten der Stallhaltung zurückgedrängt wurde. Das in mehrjährigem Turnus durchgeführte Ausrechen der Bestände hatte einen erheblichen Entzug von Nährstoffen, vor allem von Stickstoff zur Folge, der maßgeblich zur Verarmung der Wuchsorte und damit zum Erscheinungsbild des ‚Steckerlaswaldes‘ beitrug (KREUTZER 1972; REHFUESS 1990; SCHÖPS 1993). Auf der anderen Seite hat diese Entnahme verhindert, dass größere Mengen der organischen Verbindungen aus der Streu in den Boden gelangen konnten. Dies wurde erst nach Einstellung der Streunutzung möglich. Die nun einsetzende zweite Phase dürfte daher trotz der Kürze ihrer Dauer die massivsten Auswirkungen auf die Böden gehabt haben. Die heute im Reichswald weitläufig verbreiteten Podsole sind somit in vielen Fällen eine Folgeerscheinung der systematisch betriebenen Nadelbaumaufforstungen der vergangenen 200 Jahre – und des gleichzeitigen Ausschlusses anderweitiger Waldnutzungen. Erst durch die Akkumulation der Nadelstreu konnte das Prozessgefüge ‚Podsolierung‘ in jenen Teilen des Reichswaldes voll wirksam werden, die ursprünglich mit Laub- oder Mischwäldern bestockt waren bzw. in denen die Nadelstreu vormals entfernt wurde.

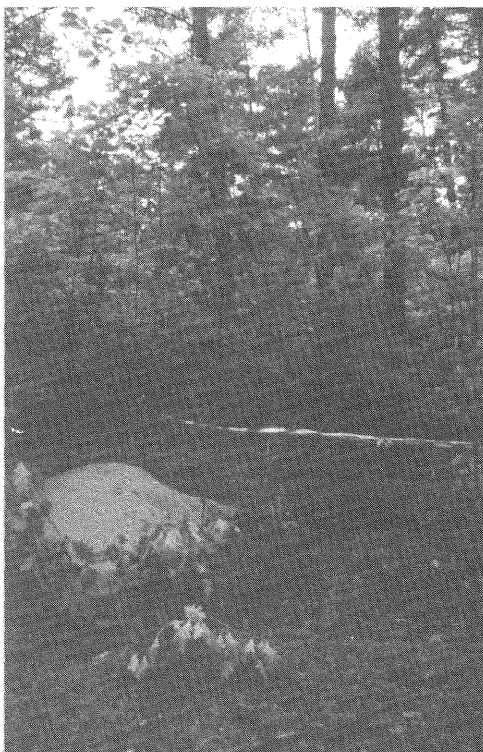
Nun mögen 50 bis 200 Jahre sehr kurz erscheinen, um weitreichende Veränderungen in Böden zu bewirken, doch gibt es zahlreiche Befunde, die solch rasche Entwicklungen bestätigen. Untersuchungen in dänischen Kiefernforsten haben z.B. gezeigt, dass sich in Aufforstungsflächen auf vormals bewegten Dünen bereits innerhalb eines Jahrhunderts Rohhumusdecken im Dezimeterbereich bildeten, die erhebliche Versauerungen und Auslaugungen der obersten mineralischen Horizonte von ebenfalls bis zu einem Dezimeter zur Folge hatten (STÜTZER 1998). Mehrere vergleichbare Beispiele nennt auch MILES (1985). In die gleiche Richtung weist zudem eine Untersuchung von EMMERICH (1995), der wahrscheinlich machen konnte, dass im Buntsandstein-Odenwald tiefgründig ausgelaugte Podsole mit mächtigen Ortsteinhorizonten innerhalb der letzten 700 Jahre entstanden sind. Besonders anfällig für solche rasch ablaufenden Stoffverlagerungen sind naturgemäß Böden, deren Ausgangssubstrate sehr geringe Pufferkapazitäten besitzen. Dies ist bei den Dünen- und Flugsanden im Nürnberger Reichswald der Fall, deren Quarzgehalt in der Regel über 90%, vielfach sogar über 95% beträgt (BERGER 1951; TRÄNKLE 1998). Ihr Restmineralgehalt ist demzufolge kaum in der Lage, die in den Boden eindringenden organischen Verbindungen langfristig zu neutralisieren und einer Versauerung entgegenzuwirken.



*Foto 1: Standort 1a. Ein für den heutigen Reichswald typisches Bild: weite Teile des Waldes werden von schwachwüchsigen Kiefern beherrscht. Im Bildmittelpunkt erkennt man die Profilgrube*

### 3 Von der Degradation zur Regradation

Um die Nadelbaum-Monokultur und die damit verbundenen Risiken und negativen Auswirkungen einzudämmen, gibt es seit etwa vier Jahrzehnten Bestrebungen der Forstämter, den Nürnberger Reichswald wieder in einen naturnahen Laub- und Mischwald zu restrukturieren (Foto 1 und 2). Es wird erwartet, dass dies auch einen positiven Einfluss auf die Böden hat, der das negative Prozessgefüge der vergangenen Jahrhunderte rückgängig macht. Zu den erwarteten Entwicklungen gehören vor allem eine (natürliche) Bodenverbesserung durch die Bildung günstigerer Humusformen und ein verbesserter Humusabbau. Damit verknüpft wäre eine Verbesserung im Säurestatus, die weitere vertikale Stoffverlagerungen und Stoffverluste verhindern soll (=Regradation). Mittelfristig wäre darüber hinaus eine Veränderung der Profilmorphologie zu erwarten, die durch eine Auflösung bzw. Durchmischung der Auslaugungs- und Anreicherungshorizonte und durch eine Entwicklung von Ober- und Unterböden gekennzeichnet ist, wie sie zumindest teilweise bereits in den ursprünglichen Böden vorhanden waren (=Depodsolierung).



*Foto 2: Standort 1b. Die Versuche, die Nadelbäume mit Laubhölzern zu unterbauen, zeigen überwiegend positive Ergebnisse. So könnte bereits in einigen Jahrzehnten aus dem Nadelforst wieder ein diversifizierter Mischwald werden*

Bezüglich weitgehend natürlicher Regradationen liegen bereits positive Erfahrungen aus anderen Gebieten vor. So belegen Untersuchungen von HEITZ (1999) aus der Münchener Schotterebene, dass durch tiefreichende Wurzeln von Laubbäumen ein sogenannter „Basenpumpeneffekt“ erzielt wird, durch den Nährstoffe aus tiefen Bodenschichten aufgenommen werden, nach dem Laubabwurf im Zuge der Remineralisation in die oberen Bodenschichten gelangen und damit zu einer allmählichen Verbesserung des Säure- und Nährstoffstatus führen. Die anhand von

Parabraunerden auf basenreichen Schottern gewonnenen Ergebnisse sind allerdings nicht unmittelbar auf die wesentlich ärmeren Sandböden des Reichswaldes übertragbar, wie einige gescheiterte Anpflanzversuche in der Anfangsphase der Restrukturierung gezeigt haben. Durch die starke Verarmung kann die Restrukturierung auf den armen Sandböden zudem nur mit anspruchslosen Laubbäumen wie der Roteiche (*Quercus rubra*) oder der Stieleiche (*Quercus robur*) durchgeführt werden, wobei begleitende Düngemaßnahmen meist unumgänglich sind. Dennoch: sollten bereits in frühen Phasen der Restrukturierung positive Veränderungen in den Böden feststellbar sein, wäre dies ein Hinweis, dass selbst arme Böden - zumindest in frühen Stadien der Degradation - ohne hohen technischen Aufwand zu einer Selbstregulation fähig sind. Zugleich ließen sich daraus Rückschlüsse auf die Geschwindigkeit der regradierenden und depodsolierenden Prozesse ziehen.

#### 4 Ansatz der eigenen Arbeiten

Zur Ermittlung der Veränderungen, die seit Beginn der Restrukturierungen in den Böden des Reichswaldes stattgefunden haben, wurden von REISSENWEBER (2000) mehrere Vergleichsflächen bodenkundlich untersucht. Bei den nachfolgenden sechs Beispielen handelt es sich in allen Fällen um Böden aus äolisch transportierten Sanden (Tab. 1). Im ersten Fall wurden zwei benachbarte Flugsandflächen im Sebalder Reichswald gewählt, rund 3 km südlich von Buckenhof, von denen eine ausschließlich mit Kiefern bestockt ist, während der Vergleichsbestand vor 19 Jahren mit Stieleichen (*Quercus robur*) unterbaut wurde (Standort 1a, 1b).

Beim zweiten Untersuchungspaar, etwa 2 km südwestlich von Kalchreuth am Tennenloher Weg gelegen, handelt es sich um Standorte auf Dünensand. Der erste ist wiederum ein reiner Kiefernbestand (Standort 2a), der andere wurde vor 34 Jahren mit Roteichen (*Quercus rubra*) unterbaut (Standort 2b). Dieser Unterbau war mit einer mechanischen Störung des Bodenprofils verbunden, die im oberen Dezimeter zu einer partiellen Profilumkehr geführt hat. Die beiden Vergleichspaare weisen bezüglich der Artenzusammensetzung ihrer Kraut- und Bodenschicht kaum Unterschiede auf, doch nimmt mit fortschreitendem Alter der Restrukturierung der Deckungsgrad der bodennahen Vegetation wegen der zunehmenden Beschattung durch die Bäume ab.

Tabelle 1: Lage, standörtliche Merkmale der Untersuchungsflächen und Deckungsgrad der bestandsbildenden Arten

Standort	1a	1b	2a	2b	3	4
Lage	R 443154 H 549252	R 443161 H 549242	R 443418 H 549009	R 443427 H 54900	R 445215 H 547727	R443726 H549431
Substrat	Flugsand	Flugsand	Düne	Düne	Düne	Flugsand
Bestandstyp	Nadelwald	Mischwald	Nadelwald	Mischwald	Nadelwald	Laubwald
Alter des Bestandes*	80	107 / 19	70	70 / 34	100	140
Düngung	nein	1980	1977, 1988	1977, 1988	?	nein
Baumschicht <i>Pinus sylvestris</i> <i>Quercus rubra</i> <i>Quercus robur</i> <i>Fagus sylvatica</i>	3	3  3	3	2  4	4	5 <sup>#</sup>
Krautschicht <i>Vaccinium vitis-idaea</i> <i>Vaccinium myrtillus</i> <i>Calluna vulgaris</i> <i>Deschampsia cespitosa</i>	3  2  1	3  3	3  3  1  4	1  1	2  2  2	
Bodenschicht <i>Pleurozium schreberi</i> <i>Hypnum cupressiforme</i> <i>Polytrichum formosum</i> <i>Dicranum sp.</i> <i>Cladonia sp.</i>	3  2  3	2  2	3  3	2  2	1    1 2	

\* = zweiter Wert gibt das Alter seit der Restrukturierung an

<sup>#</sup> = typischer Herbstaspekt ohne Bodendecker

Neben den beiden Vergleichspaaren wurde ein weiterer reiner Kiefernbestand im Lorenzer Reichswald, ca. 3 km nördlich von Röthenbach bei Altdorf gewählt (Standort 3), bei dem das verbreitete Vorkommen von Strauchflechten darauf hindeutete, dass es sich um einen ursprünglichen oder zumindest potentiell-natürlichen Kiefernwuchsort handelt (HOHENESTER 1978). Vergleichbare Standorte wurden aus dem Sebalder Reichswald nicht bekannt. Als Beispiel für einen reinen Laubwald wurde schließlich ein 140 Jahre alter Buchenbestand (*Fagus sylvatica*), ca. 1 km nördlich des Kreuzweihers gewählt (Standort 4).

Zur Untersuchung der Böden wurden Profilgruben von jeweils 1 m Kantenlänge ausgehoben. Im Gelände wurden Humusform, Horizontmächtigkeiten, Ausprägung der Horizontgrenzen, Gefüge, Durchwurzelung, Hydromorphiemerkmale und sonstige Auffälligkeiten erfasst. Für die Laboranalysen wurden die organischen Auflagen anschließend auf einer Fläche von 100 cm<sup>2</sup> entnommen und aus den mineralischen Horizonten je zwei 100 cm<sup>3</sup>-Proben gezogen. Im Labor wurde eine Untersuchung bezüglich der Kenngrößen: Lagerungsdichte, Körnung, pH-Wert (in Wasser und in 0,01 M CaCl<sub>2</sub>-Suspension), Humusgehalt (=Glühverlust), Gesamtstickstoff sowie der pedogenen und amorphen Eisen- und Aluminiumgehalte vorgenommen. Um die Beeinflussung der Standorte durch in den Jahren 1976 bis 1988 vorgenommene Düngungen mit Kalkammonsalpeter bzw. Dolomit-Gesteinsmehl zu ermitteln, wurden die Böden außerdem auf ihren Kalkgehalt untersucht. Alle Analysen wurde gemäß den Vorgaben in SCHLICHTING et al. (1995) ausgeführt.

## 5 Ergebnisse

### 5.1 Allgemeine Merkmale der Böden

Eine wesentliche Voraussetzung für die Vergleichbarkeit der untersuchten Böden war die weitgehende Übereinstimmung bezüglich ihrer Ausgangssubstrate. Die Korngrößenanalyse belegt, dass diese Vergleichbarkeit gegeben ist, denn es gibt nur geringe Abweichungen zwischen den Profilen und innerhalb derselben (Abb. 1). In allen Fällen liegt die Hauptkomponente beim Mittelsand, dem 20-40% Grobsand beigemischt sind; mineralogisch handelt es sich dabei fast ausschließlich um Quarz (BERGER 1951; TRÄNKLE 1998). Die für äolisch transportierte Sande relativ grobe Körnung ist im Reichswald typisch. In einzelnen Fällen kann ein hoher Anteil grober Partikel auch auf deluviale Einschwemmungen im Zuge von Starkniederschlägen zurückzuführen sein (HABBE 1997). Damit sind jedoch keine Änderungen in der mineralogischen Zusammensetzung verbunden. Höhere Gehalte an Schluff und Ton, die auf die Anwesenheit verwitterbarer Minerale deuten, wurden in keinem Profil festgestellt. Auch erbrachten die Kalkgehaltsbestimmungen in keinem Fall erhöhte Karbonatwerte, was bei einer Wirkungsdauer von 7-15 Jahren kaum anders zu erwarten war. Die Düngemaßnahmen lassen sich jedoch immer noch anhand erhöhter pH-Werte nachweisen (s.u.).



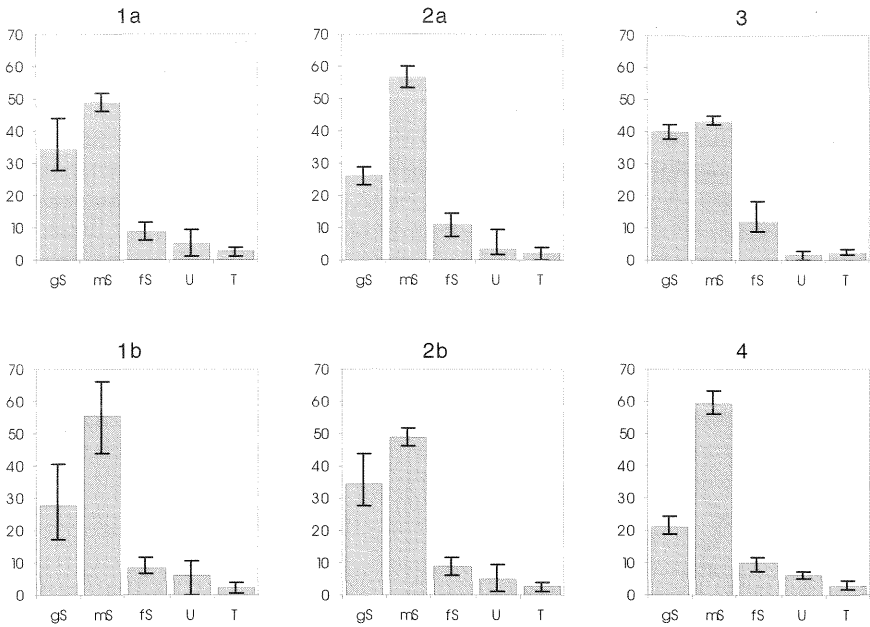


Abb. 1: Korngrößenverteilung innerhalb der sechs Profile. Angegeben sind die Mittel-, Maximal- und Minimalwerte in Gew. %

Da die Sande nahezu frei von Bindemitteln sind, weisen ihre mineralischen, humusarmen Horizonte durchweg Einzelkorngefüge auf. Aufgrund der geringen Bindung der Partikel, ihrer groben Körnung und der für sandige Lockersedimente typisch mäßigen Lagerungsdichten ist die Wasserspeicherfähigkeit der Böden sehr gering. Am Laubwaldstandort 4 wird dieser Nachteil jedoch dadurch gemindert, dass die Obergrenze des Grundwasserspiegels 45 cm unter der Geländeoberfläche liegt und die Durchwurzelung bis in den Grundwasserschwankungsbereich reicht. Durch das phasenhaft hoch anstehende Grundwasser ist der Unterboden stark rostfleckig, was sich auch in einer leichten Zunahme der Eisengehalte bemerkbar macht (Abb.3)

Geringe hydromorphe Merkmale sind auch am Standort 1 zu erkennen. Allerdings liegt der Grundwasserspiegel hier mindestens 60 cm unter der Geländeoberfläche. Zudem beträgt der Flächenanteil der Oxidationsmerkmale nur etwa 2%, was auf allenfalls episodisch hoch anstehendes Grundwasser schließen lässt. An den Standorten 2 und 3 sind die Pflanzen hingegen ausschließlich auf eine Versorgung durch das Sickerwasser angewiesen. Aufgrund ihrer unterschiedlichen Wasserregime sind die Böden am Standort 1 daher typologisch als Gley-Podsole, an den Standorten 2 und 3 als Podsole und am Standort 4 als Podsol-Gley einzuordnen.

## 5.2 Veränderungen der humosen Oberböden

Trotz der relativen kurzen Zeit seit Beginn der Restrukturierungen sind bereits Unterschiede bezüglich der Humusformen zwischen den reinen Nadelbaum- und den Mischbeständen erkennbar, die auf eine allmähliche Regeneration hindeuten. Generell sind die Humusformen in den Mischbeständen günstiger als in den benachbarten Nadelwäldern. Während die Böden im Nadelwald meist unzersetzte Rohhumusaufgaben tragen, am Standort 1a unter einer weitgehend geschlossenen Bodenbedeckung durch die Drahtschmiele (*Avenella flexuosa*) partiell auch einen Graswurzelfilzmoder, handelt es sich in der 19-jährigen Umstrukturierungsfläche um einen typischer Moder und im 34-jährigen Mischbestand bereits um einen mullartigen Moder. Die günstigste Humusform ist demzufolge auch im alten Laubbaumbestand anzutreffen. Hier handelt es sich um einen F-Mull mit locker gelagertem Of-Horizont. Für die beiden Mischbestände ist eine Weiterentwicklung in diese Richtung vorerst allerdings nicht zu erwarten, da die weiter anfallende Nadelstreu einer raschen Remineralisierung entgegensteht.

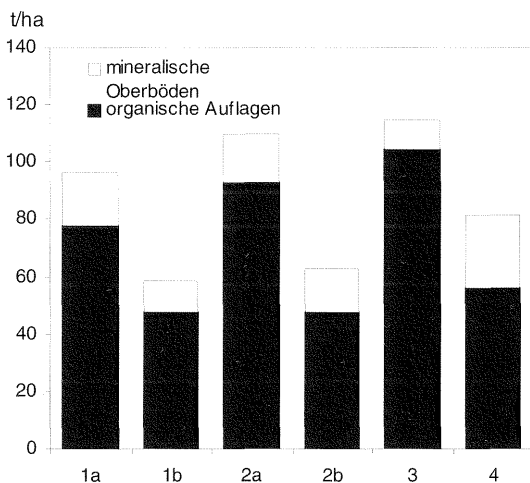


Abb. 2: Humusmengen in den organischen Auflagen und den mineralischen Oberböden

Deutliche Unterschiede zwischen den Standorten zeigte auch die gravimetrische Bestimmung der Humusmengen. Obschon ein direkter Vergleich aufgrund der unterschiedlichen Struktur der Bestände nur mit Vorbehalt möglich ist, fällt dennoch auf, dass die in den Auflagehorizonten der Nadelbaumbestände akkumulierten Humusmengen fast doppelt so hoch sind wie in den Mischbeständen. Bemerkenswert an den Mischbeständen ist wiederum, dass in ihnen der Humusgehalt der mineralischen Oberböden zwar anfänglich gering ist, jedoch kontinuierlich zunimmt (Abb. 2). Dies weist auf zwei wesentliche Entwicklungen an den laubbaumreichen Stand-

orten hin: zum einen auf eine bessere Remineralisation der organischen Auflagen, zum anderen auf eine verstärkte Humifizierung und Infiltration der dunklen Huminstoffe in die Oberböden. Diese Prozesse, die beide ihre Ursachen in einer Zunahme der bodenbiologischen Aktivität haben, sind auch an der Form der Übergänge zwischen den organischen Auflagen und den mineralischen Horizonten erkennbar. Während in den Nadelbaumbeständen die organischen Horizonte stets scharf von den mineralischen Horizonten abgegrenzt sind, ist dieser Übergang im Misch- und Laubwald diffus. Der verstärkte Um- und Abbau der humosen Auflagen an den laubbaumreichen Standorten wird durch die chemische Bodenanalyse bestätigt. Während die organischen Auflagen der Nadelwaldstandorte die für Rohhumus typisch weiten C/N-Verhältnisse aufweisen, ist diese Relation bei den Mischwäldern und vor allem im Laubwald deutlich geringer (s. Tab. 2).

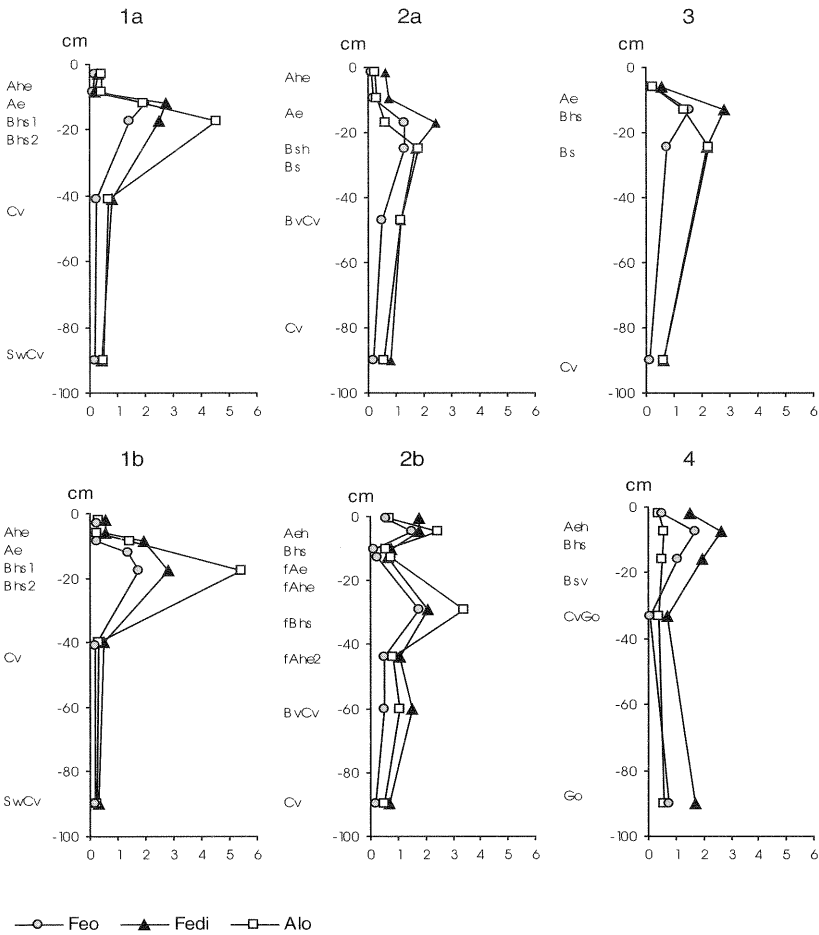


Abb. 3: Verlaufskurven der Metallgehalte in den sechs Profilen. Alle Angaben in g/kg

Tab. 2: Bodenphysikalische und -chemische Kennwerte der sechs Profile

<b>1a: Kiefernbestand 80 J. / Gley-Podsol</b>								
Horizont	Tiefe cm	Farbe feldfrisch	LD g/cm <sup>3</sup>	pH H <sub>2</sub> O	pH CaCl <sub>2</sub>	C <sub>ges.</sub> %	N <sub>ges.</sub> %	C/N
L-Of	9-2	7,5YR 3/4	0,09	3,10	2,45	47,6	1,02	47
Oh	2-0	7,5YR 3/2	0,22	3,10	2,47	20,5	0,54	38
Ahe	0-6	7,5YR N4	1,31	3,50	3,04	1,0	0,04	27
Ae	6-11	5YR 6/1	1,27	3,86	3,34	0,2	0,01	17
Bhs1	11-13	7,5YR 3/4	1,30	4,06	3,63	1,4	-	-
Bhs2	13-23	10YR 5/6	1,30	4,58	4,50	0,9	-	-
Cv	23-60	7,5YR 6/8	1,59	4,58	4,31	0,1	-	-
Go-Cv	60-100	7,5YR 6/6	1,55	4,66	4,27	0,1	-	-
<b>1b: Kiefernbestand 107 J. mit Eichen-Unterbau 19 J. / Gley-Podsol</b>								
Horizont	Tiefe cm	Farbe feldfrisch	LD g/cm <sup>3</sup>	pH H <sub>2</sub> O	pH CaCl <sub>2</sub>	C <sub>ges.</sub> %	N <sub>ges.</sub> %	C/N
L-Of	6-1	7,5YR 3/4	0,10	3,80	3,52	37,8	1,20	31
Oh	1-0	10YR 2/1	0,18	3,71	3,30	27,9	1,09	26
Aeh	0-41	0YR 4/1	0,66	4,39	3,68	1,2	0,05	26
Ae	4-8	5YR 6/2	0,86	4,34	3,60	0,6	0,03	24
Bhs1	8-9	7,5YR 4/6	1,05	4,53	3,90	0,8	-	-
Bhs	29-26	7,5YR 7/8	1,23	4,70	4,56	1,0	-	-
Cv	26-54	7,5YR 6/6	1,63	4,76	4,54	0,1	-	-
Go-Cv	54-100	7,5YR 6/4	1,58	4,80	4,20	0,1	-	-
<b>2a: Kiefernbestand 70 J. / Eisenhumuspodsol</b>								
Horizont	Tiefe cm	Farbe feldfrisch	LD g/cm <sup>3</sup>	pH H <sub>2</sub> O	pH CaCl <sub>2</sub>	C <sub>ges.</sub> %	N <sub>ges.</sub> %	C/N
L-Of	8-3	7,5YR 3/4	0,10	4,03	3,57	46,2	1,00	46
Oh	3-0	7,5YR 3/2	0,21	3,86	3,31	37,3	0,95	39
Ahe	0-3	10YR 3/4	0,55	4,01	3,27	0,8	0,04	20
Ae	3-16	7,5YR 4/4	1,33	4,01	3,31	0,4	-	-
Bsh	16-18	7,5YR 3/4	1,33	4,16	3,53	0,7	-	-
Bs	18-32	7,5YR 5/6	1,49	4,57	4,35	0,5	-	-
Bs-Cv	32-72	7,5 YR6/8	1,63	4,57	4,48	0,2	-	-
Cv	72-100	5YR 6/8	1,57	4,92	4,34	0,0	-	-

<b>2b: Kiefernbestand 70 J. mit Eichen-Unterbau 34 J. / Eisenhumuspodsol</b>								
Horizont	Tiefe cm	Farbe feldfrisch	LD g/cm <sup>3</sup>	pH H <sub>2</sub> O	pH CaCl <sub>2</sub>	C <sub>ges.</sub> %	N <sub>ges.</sub> %	C/N
L-Of-Oh	4-0	10YR 3/2	0,14	6,01	5,26	42,3	1,10	39
Aeh	0-1	10YR 5/1	-	5,30	4,54	1,1	0,06	18
Bhs	1-8	7,5YR 6/8	1,47	5,19	4,45	0,9	0,05	19
fAe	8-12	5YR 6/2	1,42	4,85	3,99	0,5	-	-
fBhs	12-15	7,5YR N3	1,42	6,44	5,51	1,0	-	-
fBs1	15-43	7,5YR 6/8	1,52	4,97	4,68	0,6	-	-
fBs2	43-45	5YR 6/2	1,58	4,91	4,15	0,5	-	-
Bs-Cv	45-75	7,5YR 7/8	1,65	5,00	4,46	0,2	-	-
Cv	75-100	5YR 6/6	1,66	4,93	4,36	0,0	-	-
<b>3: Kiefernbestand 100 J. / Eisenpodsol</b>								
Horizont	Tiefe cm	Farbe feldfrisch	LD g/cm <sup>3</sup>	pH H <sub>2</sub> O	pH CaCl <sub>2</sub>	C <sub>ges.</sub> %	N <sub>ges.</sub> %	C/N
L-Of	8-4	7,5YR 3/4	0,15	3,70	2,76	47,8	0,78	61
Oh	4-0	7,5YR 3/2	0,30	3,59	2,59	19,7	0,46	43
Ae	0-12	7,5YR N6	1,41	4,06	3,38	0,3	0,01	26
Bs1	12-14	7,5YR 4/4	1,48	4,24	3,77	0,7	-	-
Bs2	14-35	7,5YR 5/6	1,55	4,55	4,43	0,5	-	-
Cv	35-100	7,5YR 6/8	1,66	4,58	4,51	0,1	-	-
<b>4: Buchenbestand 140 J. / Podsol-Gley</b>								
Horizont	Tiefe cm	Farbe feldfrisch	LD g/cm <sup>3</sup>	pH H <sub>2</sub> O	pH CaCl <sub>2</sub>	C <sub>ges.</sub> %	N <sub>ges.</sub> %	C/N
L-Of-Oh	6-0	7,5YR 3/4	0,15	4,45	4,16	31,2	2,00	16
Aeh	0-41	0YR 3/1	1,32	3,78	3,06	2,4	0,16	15
Bhs	4-11	7,5YR 3/2	1,29	3,72	3,16	1,0	-	-
Bs	11-21	10YR 4/4	1,40	3,97	3,47	0,4	-	-
Cv-Go	21-45	10YR 5/4	1,49	4,44	3,93	0,0	-	-
Go	45-100	10YR 5/4	1,49	4,60	3,96	0,1	-	-

### 5.3 Veränderungen der mineralischen Horizonte

Erste Auswirkungen der Restrukturierung sind auch in den mineralischen Horizonten nachweisbar. Dies macht sich u.a. im Säurestatus der Böden bemerkbar. Entsprechend des einheitlich basenarmen Substrates sind die pH-Werte des mineralischen Untergrundes an allen Standorten relativ ähnlich. Sie liegen bei Werten zwischen 4,5

und 4,9 im stark sauren Austauscher-Pufferbereich. Unter dem Einfluss der Nadelstreu sind die pH-Werte der oberen mineralischen Horizonte in der Vergangenheit jedoch weiter herabgesenkt worden und in den Aluminiumpufferbereich gelangt. Darüber hinaus, wenn auch im Rahmen dieser Untersuchung nicht nachweisbar, ist für alle Standorte ein nicht unerheblicher Einfluss durch saure Immissionen anzunehmen, die ebenfalls zur Absenkung der pH-Werte beigetragen haben dürften. Am stärksten betroffen von der Versauerung ist der ungedüngte Kiefernstandort 1a, sehr niedrig ist allerdings auch der pH-Wert im Oberboden des ungedüngten Laubbaumstandortes. Dies lässt vermuten, dass auch im heutigen Laubwald einmal Rohhumusbildner wuchsen. Durch die aktuelle Bestockung wird der Versauerung jedoch entgegengewirkt. Erkennbar ist dies am auffallend hohen pH-Wert der organischen Auflage und dem gegenüber dem Unterboden leicht erhöhten pH-Wert des mineralischen Oberbodens, der offenbar auf den ‚Basenpumpeneffekt‘ der Laubbäume zurückzuführen ist. Ähnlich positive Entwicklungen sind – hier vor allem aufgrund von Düngung – an den Nadelbaum- und Mischwaldbeständen 1b, 2a und 2b festzustellen (Tab. 2). Auch in ihnen ist gegenüber dem ungedüngten Standort 1a eine Erhöhung der pH-Werte erkennbar, die am Standort 2b nicht zuletzt aufgrund der mechanischen Durchmischung besonders ausgeprägt ist.

Da die Wirkung von Düngemaßnahmen zeitlich begrenzt ist und zugleich durch die anfallende Streu beeinflusst wird, ist an den Nadelbaumstandorten auch weiterhin mit einer Versauerung zu rechnen, sofern dem nicht durch erneute Düngergaben entgegen gewirkt wird. In den Mischbeständen verläuft die Entwicklung dagegen günstiger. Dies zeigt ein Vergleich der pH-Werte der gleichzeitig gedüngten Standorte 2a und 2b. Durch die massiven Einwirkungen der Nadelstreu sind die pH-Werte am Standort 2a mittlerweile wieder stark abgesunken, auch wenn sie immer noch etwas höher sind als an den ungedüngten Standorten 1a und 3. Im Mischbestand ist das Versauerungsrisiko dagegen geringer, weil durch den kontinuierlich wachsenden Anteil der Laubbäume auch der Anteil leichter abbaubarer und weniger aggressiver organischer Substanzen zunimmt. Insgesamt gesehen dürften sich die pH-Werte an den laubbaumreichen Standorten dadurch allmählich wieder dem ursprünglichen Austauscher-Pufferbereich nähern.

#### **5.4 Von der Podsolierung zur Depodsolierung**

Die Rohhumus-Akkumulation hatte in allen Böden nicht nur eine Versauerung, sondern auch nachweisliche Stoffverlagerungen von den Ober- in die Unterböden zur Folge. Dies lässt sich sowohl für die Nadelbaumstandorte als auch für die heutigen Laub- und Mischwälder anhand der erhöhten Metallkonzentrationen in den Unterböden nachweisen (Abb. 3). Wegen der üblicherweise höheren Mengen und der leichteren Löslichkeit von Aluminium überwiegt in den meisten Fällen die Al-Verlagerung gegenüber der Fe-Verlagerung. Eine Ausnahme diesbezüglich bildet der Laubbaumstandort, in dem die Al-Konzentrationen auffallend niedrig sind. Die Ursachen

dafür sind unbekannt und basieren möglicherweise auf Messfehlern. Die Verlagerung des schwer löslichen Eisens weist jedoch auch an diesem Standort auf eine zumindest phasenhaft starke Podsolierung hin, deren Ursache nicht in der aktuellen Vegetation gesucht werden kann. Die geringe Tiefe des Metallmaximums (4-11 cm unter der Geländeoberfläche) ist zugleich ein Indikator dafür, dass die Degradationsphase relativ kurz gewesen sein muss; möglicherweise stand sie in Zusammenhang mit einer Waldauflichtung und der Ausbreitung zwergrauschreicher Ersatzgesellschaften.

Die unter den augenblicklichen Bedingungen offenbar zunehmende Infiltration der Huminstoffe in die Oberböden der heutigen Mischbestände hat in diesem Zusammenhang eine weitere beachtenswerte Auswirkung: sie ‚maskiert‘ die ehemaligen Podsolierungsprozesse und deren sichtbare Erscheinungsform, die Bleichhorizonte, die irgendwann nur noch analytisch, nicht jedoch mehr optisch erkennbar sein werden. Dies ist beim Laubbaumstandort bereits der Fall. Hier wird die Farbe des ehemaligen Eluvialhorizontes bereits vollständig von den dunklen Huminstoffen bestimmt. Doch auch in den Mischwaldbeständen zeichnet sich ein allmählicher Wandel vom hellen Ae oder Ahe zu einem dunklen Aeh oder Ah ab, wie an den MUNSSELL-Farbwerten erkennbar wird (Tab. 2).

Bezüglich der Verteilung der Metalle innerhalb der Bodenprofile sind dagegen in allen untersuchten Böden bislang keine auffälligen Veränderungen erkennbar, sieht man einmal von Profil 2b ab, bei dem der Kurvenverlauf wesentlich durch die mechanische Störung bestimmt wird. Eine Verringerung der Metallgehalte in den B-Horizonten, wie sie NIELSEN et al. (1993) in dänischen Heidepodsolen nach der Einwanderung von Eichen feststellen konnten, ist im Reichswald bislang nicht erkennbar. Von einer aktiven Depodsolierung kann daher in diesem Stadium der Restrukturierung noch nicht gesprochen werden, wohl aber davon, dass die Rahmenbedingungen für Podsolierung in den Mischbeständen zum gegenwärtigen Zeitpunkt kaum noch gegeben sind. Die Auflösung der Metallmaxima in den Unterböden dürfte dagegen vor allem von einer mechanischen Durchmischung infolge verstärkter Durchwurzelung und/oder einer verstärkten Tätigkeit bodenwühlender Tiere in den zukünftigen Mischwäldern abhängen.

## 6 Fazit und Ausblick

Die vor rund vier Jahrzehnten eingeleitete Restrukturierung des Nürnberger Reichswaldes zu einem diversifizierten Forst aus Nadel-, Misch- und Laubbaumbeständen zeigt erste positive Veränderungen in den Böden. Gegenüber den reinen Nadelbaumbeständen werden die organischen Auflagen in den jungen Mischbeständen besser humifiziert und remineralisiert. Damit wird zugleich die Versauerung und Auslaugung der Böden gebremst. Selbst in den extrem basenarmen Sandböden des Reichswaldes fungieren die Laubbäume als natürliche ‚Basenpumpen‘, wenn durch das Grundwasser hinreichend Nährstoffe zugeführt werden. An stark degradierten,

grundwasserfernen Standorten sind erfolgreiche Anpflanzungen von Laubbäumen dagegen nur mit anfänglicher Unterstützung durch kontrollierte Düngegaben möglich. Dann bieten allerdings auch diese Standorte ein gewisses Potential für die Etablierung von Laubbäumen.

Die Autoren danken Herrn Prof. Dr. Reinhold Roßner, Institut für Geologie der Universität Erlangen-Nürnberg, und Herrn Forstdirektor Dr. Andreas Knorr vom Forstamt Erlangen für die kritische Durchsicht des Manuskriptes.

## Literatur

- Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden* 1994: Bodenkundliche Kartieranleitung. Stuttgart, Schweizerbart.
- BERGER, K.B. 1951: Die Dünen im Raum von Nürnberg und Erlangen. Geologische Blätter für Nordost-Bayern 1, 70-74.
- BRUNNER, G. 1992: Die „Potentielle Natürliche Vegetation“ des Sebalder Reichswaldes. - Erlanger Bausteine zur Fränkischen Heimatforschung 40, 341-392.
- EMMERICH, K.-H. 1994. Podsole im Buntsandstein-Odenwald. Geologisches Jahrbuch Hessen 122, 173-184.
- Erlanger Bausteine zur fränkischen Heimatforschung 1992 [Titelbild].
- HABBE, K.A. 1997: Die äolischen Sandablagerungen vor dem Stufenhang der Nördlichen Frankenalb – Probleme, Beobachtungen, Schlussfolgerungen. Erlanger Geographische Arbeiten 59.
- HEITZ, R. 1999: Umbau von Fichtenreinbeständen in naturnahe Mischwälder. Auswirkungen auf bodenchemischen Zustand und Bioelementhaushalt. Freising, Geobotanica.
- HOHENESTER, A. 1978: Die potentielle natürliche Vegetation im östlichen Mittelfranken (Region 7). Erlanger Geographische Arbeiten 38.
- HORNDASCH, M. 1962: Das Antlitz des Mittelfränkischen Waldes im Wandel von fünf Jahrhunderten. Dissertation Universität Freiburg.
- KREUTZER, K. 1972: Über den Einfluss der Streunutzung auf den Stickstoffhaushalt von Kiefernbeständen (*Pinus sylvestris* L.). Forstwissenschaftliches Centralblatt 91, 263-270.
- MILES, J. 1985: The pedogenic effects of different species and vegetation types and the implications of succession. Journal of soil science 36, 571-584.
- NIELSEN, K.E.; DALSGAARD, K.; NØRNBORG, P. 1987: Effects on soils of an oak invasion of a Calluna heath, Denmark. I. Morphology and chemistry. Geoderma 41, 79-95.
- OTT-ESCHKE, M. 1952: Pollenanalytische Untersuchungen im Gebiet des Nürnberger Reichswaldes. Forstwissenschaftliches Centralblatt 71, 48-63.
- OTT-ESCHKE, M. 1951: Versuch einer Rekonstruktion der natürlichen Zusammensetzung des Nürnberger Reichswaldes durch Auswertung historischer Überlieferungen. Forstwissenschaftliches Centralblatt 70, 728-746.
- REHFUESS, K.E. 1990: Waldböden. Pareys Studentexte 29. Hamburg und Berlin, Parey.
- REISSENWEBER, C. 2000: Die Regeneration armer Sandböden im Sebalder Reichswald durch naturnahen Waldbau. Diplomarbeit am Institut für Geographie der Universität Erlangen-Nürnberg.



- ROSSNER, R. 1990: Variationsbreite und ökologischer Zustand der Böden im nordwestlichen Sebalder Reichswald, aufgezeigt anhand eines Querschnittes zwischen Gründlach und Schwabachtal. Erlanger Geographische Arbeiten 50.
- SCHLICHTING, E.; BLUME, H.-P.; STAHR, K. 1995: Bodenkundliches Praktikum. Pareys Studentexte 81. Berlin, Blackwell.
- SCHÖPS, M.E. 1993: Die Streunutzung im Sebalder Reichswald im 19. und 20. Jahrhundert und ihre Auswirkung auf die Forststandorte. Magisterarbeit am Institut für Geographie der Universität Erlangen-Nürnberg.
- SPERBER, G. 1968: Der Reichswald bei Nürnberg. Aus der Geschichte des ältesten Kunstforstes. Mitteilungen aus der Staatsforstverwaltung Bayerns 37.
- SPORHAN-KREMPPEL, L.; STROMER, W.v. 1969: Die Nadelholzsäure in den Nürnberger Reichswäldern zwischen 1469 und 1600. Mitteilungen der Altnürnberger Landschaft 18, Sonderheft April.
- STÜTZER, A: 1998: Early stages of podzolisation in young aeolian sediments, western Jutland. *Catena* 32, 115-129.
- TRÄNKLE, D. 1998: Prozesse des Stofftransportes in einem Waldgebiet im Osten Nürnbergs bei Brunn, Birnthon und Netzstall. Diplomarbeit am Institut für Geographie, Universität Erlangen-Nürnberg.
- VOGTHERR J. 1952: Das floristisch-pflanzengeographische Waldbild des Nürnberger Reichswaldes jetzt und in der Vergangenheit. Mitteilungen aus der Staatsforstverwaltung Bayerns 27.
- ZEZSCHWITZ, E. VON 1979: Profilmorphologische Merkmale der Anfangsstadien der Podsolierung (Podsoligkeit). *Geologisches Jahrbuch, Reihe F* 7, 87-107.

