Sonderdruck

aus

Düsseldorfer Geographische Schriften

Herausgegeben vom Geographischen Institut

durch

A. Gerstenhauer, G. Glebe, E. Jordan, E. Sabelberg, H. G. Steinberg
K. Vorlaufer, N. Wein, G. Wenzens

Schriftleitung: M. Fey

Heft 31

(Ulrich Radtke, Hrsg.)

Schwermetalle

Untersuchungen zur Schwermetallverteilung und -dynamik in rezenten Böden, Paläoböden, Flußsedimenten, Mooren und Kinderspielplätzen

1993
Im Selbstverlag des Geographischen Institutes der
Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf
ISSN 0935-9206

DÜSSELDORFER GEOGRAPHISCHE SCHRIFTEN	31	S. 97-115	Düsseldorf 1993

Bodenbildungen und Schwermetallverteilung im Würmlöß des niederbayerischen Donautales

G. SCHELLMANN & U. RADTKE

Zusammenfassung

In sieben Boden- und Lößprofilen aus dem niederbayerischen Donautal wurden die Gehalte von Pb, Cd, Cu, Ni, Zn, Mn und Fe analysiert und in zwei weiteren Profilen die Gehalte von Pb, Ni, Zn, Cr, Mn und Fe. Die natürlichen Schwermetallgehalte liegen sowohl im unverwitterten Löß als auch in den kalt- und warmzeitlichen Bodenhorizonten deutlich unter den Grenzwerten der Klärschlammverordnung (KLÄRVO 1992). Zu Schwermetallverlagerungen kam es sowohl im Zuge von Lessivierungsprozessen als auch durch Sicker- und Grundwässer. Neben Fe und Zn wurden davon besonders die leichter löslichen Elemente Mn > Cd > Ni erfaßt. Hierdurch fanden erhöhte Einträge in den betreffenden Ausfällungshorizonten (Bt-, S- und Go-Horizonte) statt, ohne jedoch eine nach heutigem Kenntnisstand ökologisch kritische Konzentration zu erreichen. Anthropogene Einträge beschränken sich aufgrund der überwiegend schwach sauren bis basischen pH-Bedingungen auf die A-Horizonte der heutigen Oberflächenböden. In den wenigen analysierten Bodenprofilen zeigen sich hierdurch geringe Erhöhungen der Cd- und Mn-Gehalte, z.T. auch der Pb-Gehalte. Eine paläopedologische Korrelation von interstadialen Würmlößböden auf der Basis ihrer Schwermetallführung deutet sich allein für den kräftigen Naßboden des tieferen Mittelwürms (Rhythmus II) an.

Summary

From soil and loess profiles of the lower Bavarian Danube valley the heavy metal content was analysed for Pb, Cd, Cu, Ni, Zn, Mn and Fe, in two other profiles for Pb, Ni, Zn, Cr, Mn and Fe. The natural content of the unweathered Würmian loess and the interstadial and interglacial soils is on a very low level. Under pH-conditions higher than 6 Fe, Zn, Mn, Cd and Ni were translocated by clay migration or in soluble form by water leakage and ground water. Correspondingly there are enrichments of these elements in the Bt-, S- and Go-horizons. A paleopedological correlation of the low weathered interstadial Würmian soils based on their heavy metal content seems only possible for the lower Würmian "Naßboden".

A comparison of the results allows for the distinction of natural and anthropogenic enrichments. Anthropogenic accumulation of Cd, Mn and in one profile of Pb can be found in the A-horizons of recent soils, however they show only a low level of heavy metal pollution.

1. Einleitung

Böden gehören zu unseren wichtigsten Lebensgrundlagen. Nahezu alle einmal in die Umwelt freigesetzten Schadstoffe gelangen entweder über die Atmosphäre, durch Grundwasser und Oberflächengewässer oder auf direktem Wege in Kontakt mit der Pedosphäre. Dort werden sie je nach Filter- und Puffereigenschaften der Böden unterschiedlich stark fixiert und angereichert. Über die Bio- und Hydrosphäre können sie dann in die Nahrungskette gelangen und damit auch die menschliche Gesundheit bedrohen.

Neben organischen Verunreinigungen und einzelnen Leichtmetallen bilden Schwermetallanreicherungen gefährliche Belastungen der Ökosysteme Boden, Wasser und Lebewelt. Zu den Schwermetallen zählen alle Metalle mit einer Dichte >4,5 g/cm^3. In geringen Konzentrationen bilden einige Schwermetalle wie u.a. Chrom, Nikkel, Eisen, Mangan, Zink und Kupfer für Pflanzen, Tiere und Menschen wichtige Spurennährstoffe. Zu den nach heutigem Kenntnisstand nicht notwendigen Schwermetallen zählen vor allem Cadmium, Blei, Quecksilber und Thallium. Sie entfalten bereits bei sehr geringen Gehalten toxische Wirkungen. In höherer Konzentration sind nahezu alle Schwermetalle giftig (Tab. 1).

Höhere Schwermetallgehalte in Oberflächenböden können geogenen, pedogenen und/oder anthropogenen Ursprungs sein. Anthropogene Einträge treten verstärkt in der Nähe industrieller Ballungsräume bzw. im Umfeld von Schwermetallemittenten (Industrie, Siedlungen, Verkehr) auf. Darüberhinaus können aber bis in industrieferne Regionen erhöhte Schwermetalleinträge stattfinden, zum Beispiel durch schwermetallbelastete

- Aerosole in der Luftzirkulation

Tab. 1: Tolerierbare Grenzwerte (ppm) von Schwermetallen in Böden

Element	Grenzwerte Böden (KLOKE 1980)	Grenzwerte Böden (KlärVo 1992)	kritisch für Pflanzen (BLUME 1990)	kritisch für Tierfutter (BLUME 1990)
Cd	3	1,5	5-10	0,5-1
Cu	100	60	15-20	50-3000
Ni	50	50	20-30	50-60
Pb	100	100	10-20	10-30
Zn	300	200	150-200	300-1000

- Lösungs- und Schwebfrachten in den Oberflächengewässern und Grundwasserströmungen
- Siedlungsabfälle, Klärschlämme, Düngemittel, die auf landwirtschaftliche Flächen ausgebracht werden.

Diese anthropogenen Einträge treten zu den bereits lithogen und pedogen bedingten natürlichen Ausgangsgehalten der Oberflächenböden. Dabei kann bereits im Ausgangsgestein eine höhere Schwermetallführung vorliegen. Auch im Zuge der natürlichen Bodenentwicklung finden in bestimmten Horizonten Schwermetallan- und -abreicherungen statt. Anthropogen bedingte Schwermetallanreicherungen im Boden sind daran erkennbar, daß die auftretenden Schwermetallkonzentrationen sich deutlich abheben von den natürlichen pedogenen Anreicherungen und lithogenen Ausgangsgehalten, d. h. vom sog. "geogenen background". Der Anteil der anthropogenen Schwermetallbelastung kann erst nach Quantifizierung der natürlichen Grundgehalte in einer Bodenlandschaft bestimmt werden, da bereits der geogene background Schwermetallkonzentrationen aufweisen kann, die über den für tolerierbare Gehalte von Böden festgelegten Richtwerten (KlärVO 1992, Tab. 1) liegen (u.a. KUNTZE & HERMS 1986, 196; RUPPERT 1987, 85).

Im folgenden werden Ergebnisse zur Schwermetallverteilung im Würmlöß des Niederbayerischen Donautales mit seinen Paläoböden und heutigen Oberflächenböden vorgestellt. Dabei beschränkt sich die Untersuchung auf die Schwermetalle Blei, Cadmium, Kupfer, Nickel, Zink sowie Mangan und Eisen. Neben der Erfassung lithogener Schwankungen der Schwermetallgehalte können Aussagen über die Auswirkungen unterschiedlicher warm- und kaltzeitlicher Bodendynamiken auf Metallan- bzw. -abreicherungen gemacht werden. Auf der Grundlage der natürlichen Schwankungsbreite von Schwermetallanteilen im Löß und seinen Paläoböden können anthropogene Schwermetalleinträge in die heutigen Oberflächenböden dieses Raumes besser erkannt werden. Darüberhinaus galt es zu prüfen, inwieweit es möglich ist, interglaziale und interstadiale Paläoböden anhand ihrer Schwermetallgehalte pedostratigraphisch zu korrelieren.

Eine generelle Erfassung der Schwermetallführung unterschiedlichster Ausgangsgesteine und ihrer Oberflächenböden ist für Bayern und das Donautal vom Bayerischen Geologischen Landesamt veröffentlicht (RUPPERT et al. 1988; RUPPERT 1987). Aus der geringen Anzahl von Publikationen zu Schwermetallverteilungen in Paläoböden sei stellvertretend die Arbeit von SCHERELIS (1989) in Baden-Württemberg erwähnt, da er u.a. auch interglaziale und interstadiale Lößböden bearbeitet hat.

2. Untersuchungsmethoden

Die Proben wurden im Gelände an Aufschlußwänden horizontiert entnommen. Nach ihrer Homogenisierung wurden alle Proben bei 60°C getrocknet und der Feinboden abgesiebt. Die bodenchemischen Untersuchungen erfolgten an gemörsertem Probenmaterial.

Im einzelnen wurden folgende bodenphysikalische und -chemische Untersuchungen durchgeführt:

- Korngrößenanalysen des Pelits: Pipettmethode nach KÖHN und KÖTTGEN.
- Karbonatgehalt: gasvolumetrisch nach SCHEIBLER (MÜLLER 1964).
- pH-Wert: in 0,01M $CaCl_2$-Lösung im Verhältnis 1 : 2,5.
- Schwermetalle: Königswasseraufschluß nach KlärVO (1992). Analytik mit Hilfe eines AAS 430 der Firma Perkin Elmer. Messung der Elemente Cu, Ni, Zn, Mn, Fe, Cr mit der Flammentechnik, Pb und Cd mit der Graphitrohrtechnik. Nach RUPPERT (1987, 4) erfaßt der Königswasseraufschluß meistens 90% der Totalgehalte. Bei Chrom kann die Ausbeute 20-40% niedriger liegen.

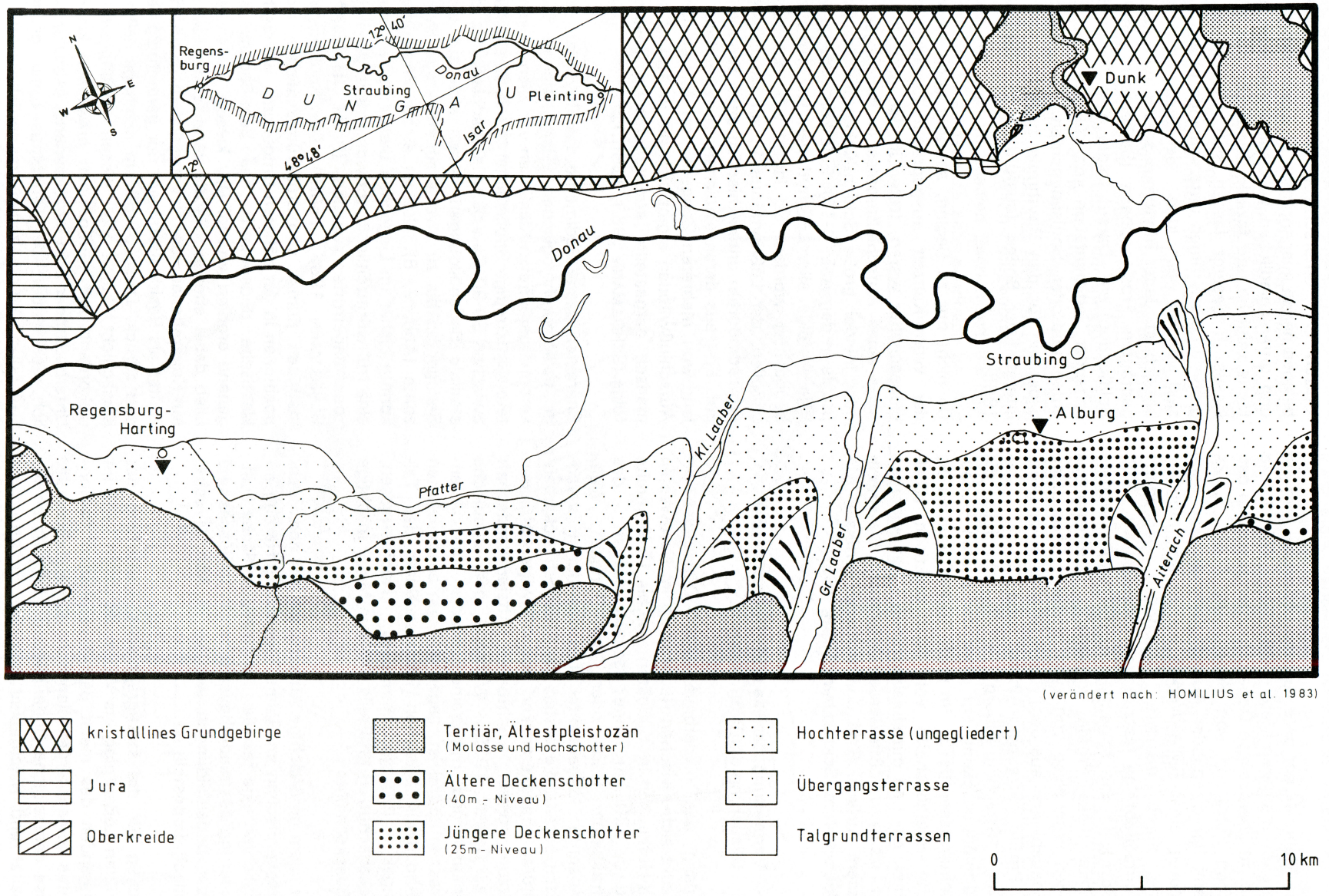

Abb. 1: Geologische Übersichtskarte mit Lage der untersuchten Profilstandorte im Donautal

3. Lage der Profilstandorte

Die Mehrzahl der untersuchten Lößprofile liegt auf den von mehreren Metern mächtigem Würmlöß (ϕ 3-5 m) überdeckten Donau-Hochterrassen am östlichen Stadtrand von Regensburg (Abb. 1, 2). Dank hervorragender Aufschlußverhältnisse beim Neubau eines BMW-Werkes war es dort möglich, eine durch mehrere Paläoböden gegliederte Würmlößabfolge festzuhalten (SCHELLMANN 1988, 138ff.). In den folgenden Ausführungen werden primär diese Profile vorgestellt. Darüberhinaus liegen Ergebnisse von zwei weiteren Lößprofilen donauabwärts aus dem Raum Straubing vor (Abb. 1: Profile "Straubing-Alburg" und "Dunk"). Das Profil "Straubing-Alburg" erfaßt ebenfalls die Würmlößbedeckung auf einer der älteren Donauhochterrassen (HT3). Im Profil "Dunk" wurden die Schwermetallgehalte von fünf reliktisch erhaltenen, alt- und mittelpleistozänen Parabraunerden auf Löß bzw. Lößfließerden untersucht. Sie sind in diesem Aufschluß in unmittelbarer vertikaler Abfolge erhalten (SCHELLMANN 1988, 163).

4. Verbreitung, fazielle und stratigraphische Gliederung der Würmlösse

Entlang des niederbayerischen Donautales erstreckt sich zwischen Regensburg im Nordwesten und Hofkirchen im Südosten eine bis 15 km breite und ca. 80 km lange Beckenlandschaft - das "Straubinger Gäu" oder "der Dungau". Weitgespannte lößbedeckte Terrassenfluren veranlaßten bereits die ersten neolithischen Ackerbaukulturen (Bandkeramiker) zur landwirtschaftlichen Nutzung dieser fruchtbaren Altsiedellandschaft (u.a. SCHIER 1985). Während der eigentliche Donautalgrund mit seinen Nieder- und Auenterrassen lößfrei ist, liegen auf den ausgedehnten prä-hochwürmzeitlichen Terrassenfluren des Talhanges (Übergangsterrasse, Hochterrassen, Deckenschotter) großteils mehrere Meter mächtige Lößdeckschichten.

Vor allem großflächige Aufschlüsse auf den Hochterrassenflächen im Raum Regensburg-Harting ermöglichten eine fazielle und stratigraphische Feingliederung des niederbayerischen Würmlösses und seiner Bodenbildungen wie sie in Abb. 3 schematisch dargestellt ist.

Wichtig für die stratigraphische Einstufung der dortigen Lößabfolge ins Würm ist deren Lage im Hangenden des meist pseudovergleyten Bt-Horizontes einer interglazialen Schotterparabraunerde. Diese eemzeitliche Bodenbildung übertrifft an Intensität und Mächtigkeit holozäne Schotterparabraunerden, wie sie auf den Niederterrassen der Donau ausgebildet sind. Innerhalb des Würmlösses gibt es dagegen keine Hinweise auf eine weitere Bodenbildungsphase mit interglazialem Habitus. Vielmehr sind verschiedene, deutlich schwächere Böden eingeschaltet. Diese typologisch z.T. unterschiedlichen Interstadialböden belegen neben ausgeprägten Erosionsdiskordanzen und unterschiedlichen Lößsedimenten eine mehrfache zeitliche und fazielle Gliederung des Würmlösses. Insgesamt lassen sich mindestens fünf größere Lößrhythmen unterscheiden (Abb. 3). Sie sind von alt nach jung als Rhythmus I bis V bezeichnet. Jeder Rhythmus setzte mit einer ausgeprägten Erosionsphase (Spülerosion und/oder Solifluktion) ein. Darauf folgte eine Zeit vorherrschender Sedimentation von Löß und/oder Fließerden und/oder Spülsedimenten. Den Abschluß bildet ein für den Rhythmus typischer, kräftiger interstadialer Boden (ausführlich in SCHELLMANN 1988).

Da nicht nur zu Beginn, sondern auch innerhalb der Würm-Kaltzeit ausgeprägte Erosionsphasen eingeschaltet waren, treten in der vertikalen Abfolge eines Aufschlußprofiles in der Regel mehr oder minder große Schichtlücken auf (s. Einzelprofile in den Abb. 4-10). Eine konkordante vertikale Abfolge aller Lößrhythmen ist bisher nicht beobachtet worden. So lagert z.B. das jüngste Lößglied, der Lößrhythmus V, an verschiedenen Profilstandorten unterschiedlich alten Würmlössen auf. Erst aus deren seitlichen Verzahnungen entlang von mehreren Zehnern von Metern langen Aufschlußwänden ergibt sich die in Abb. 3 schematisch dargestellte stratigraphische Gesamtabfolge (SCHELLMANN 1988, 138ff.).

Charakteristische Sedimente des Rhythmus I sind in paläomorphologischen Tiefpositionen neben karbonatgeröllfreien Kieslinsen vor allem geschichtete sandstreifige Spülsedimente mit Sandgehalten zwischen 30-90 Gew.%. Als abschließende interstadiale Bodenbildungen finden sich auf diesen Sedimenten bis zu zwei braunerdeartige Bv-Horizonte (Abb. 7, 8). Nur an einem Profilstandort konnte bisher im Liegenden dieser Spülsedimente eine frühwürmzeitliche, schwarzerdeartige Humuszone angetroffen werden (Profil "Hofdorf" in SCHELLMANN 1988, 158ff.). Die Spülsedimente stammen primär von frühwürmzeitlichen Hochpositionen in der näheren Umgebung, wo die feinklastische Bodenmatrix des Eem-Bodens weitgehend erodiert wurde. Das kiesige Bodenskelett blieb dabei ebenso wie die zentimetergroßen Fe-Mn-Konkretionen des eemzeitlichen SwAl-Horizontes als Residualsediment nur geringfügig verlagert zurück. Diese 30-60 cm mächtige hellgraue Kiesschicht kappt in diesen Hochpositionen diskordant den häufig noch erhaltenen kiesigen Unterboden der Eem-Parabraunerde (Abb. 6). Zeitlich repräsentiert der Rhythmus I das gesamte Frühwürm. Die erhaltenen Braunerdehorizonte von Regensburg-Harting und die schwarzerdeartige Humuszone von Hofdorf weisen auf wärmere, weitgehend bewaldete Interstadiale. Entsprechende Frühwürm-Böden werden auch aus

anderen deutschen Lößgebieten beschrieben (Abb. 3: z.B. Südniedersachsen/Nordhessen).

Erst mit dem Rhythmus II herrschen äolische Sedimentablagerungen vor. Mit dieser ersten mächtigeren Sequenz von Lößsedimenten beginnt das Mittelwürm. Bodentypologisch kommt es in den folgenden Würmabschnitten nur noch zur Ausbildung von Naßböden oder braunen Verwitterungshorizonten, wobei die Verwitterungsintensität nicht über eine Entkalkung und/oder vor allem wohl kryoklastische Verlehmung hinausreichte. Die Rhythmen II, III und IV erfassen das gesamte Mittelwürm bis zum Stillfried B-Interstadial. Fazielles Kennzeichen des Rhythmus II ist ein mit millimetergroßen Fe-Mn-Konkretionen durchsetzter Löß, der im basalen Bereich mit Sandgehalten von 17-22 Gew.% sehr sandreich ist. Auf ihm ist ein primär kalkhaltiger, kryoklastisch jedoch stark verlehmter Naßboden entwickelt mit Tongehalten zwischen 30-40 Gew.%. Derartige Naßböden bilden sich infolge von Stauwassereinwirkungen über Dauerfrostboden (FREISING 1949, 18; MEYER & ROHDENBURG 1982, 302). Beim Rhythmus II-Naßboden handelt es sich um einen Naßboden vom Gleytyp [NG]. Entsprechend besitzt er intensiv ausgeprägte Reduktions- und Oxidationsbänder von durchschnittlich 10 cm Stärke. Vollständig erhalten treten sie in doppelter Wechsellagerung von jeweils einem stark roststreifigen Oxidationshorizont an der Basis und einem auflagernden hellgrauen Reduktionshorizont auf. In Profil 9b (Abb. 8) ist nur noch der liegende Oxidationshorizont erhalten. Alle anderen sind von der Rhythmus III - Erosionsphase beseitigt worden.

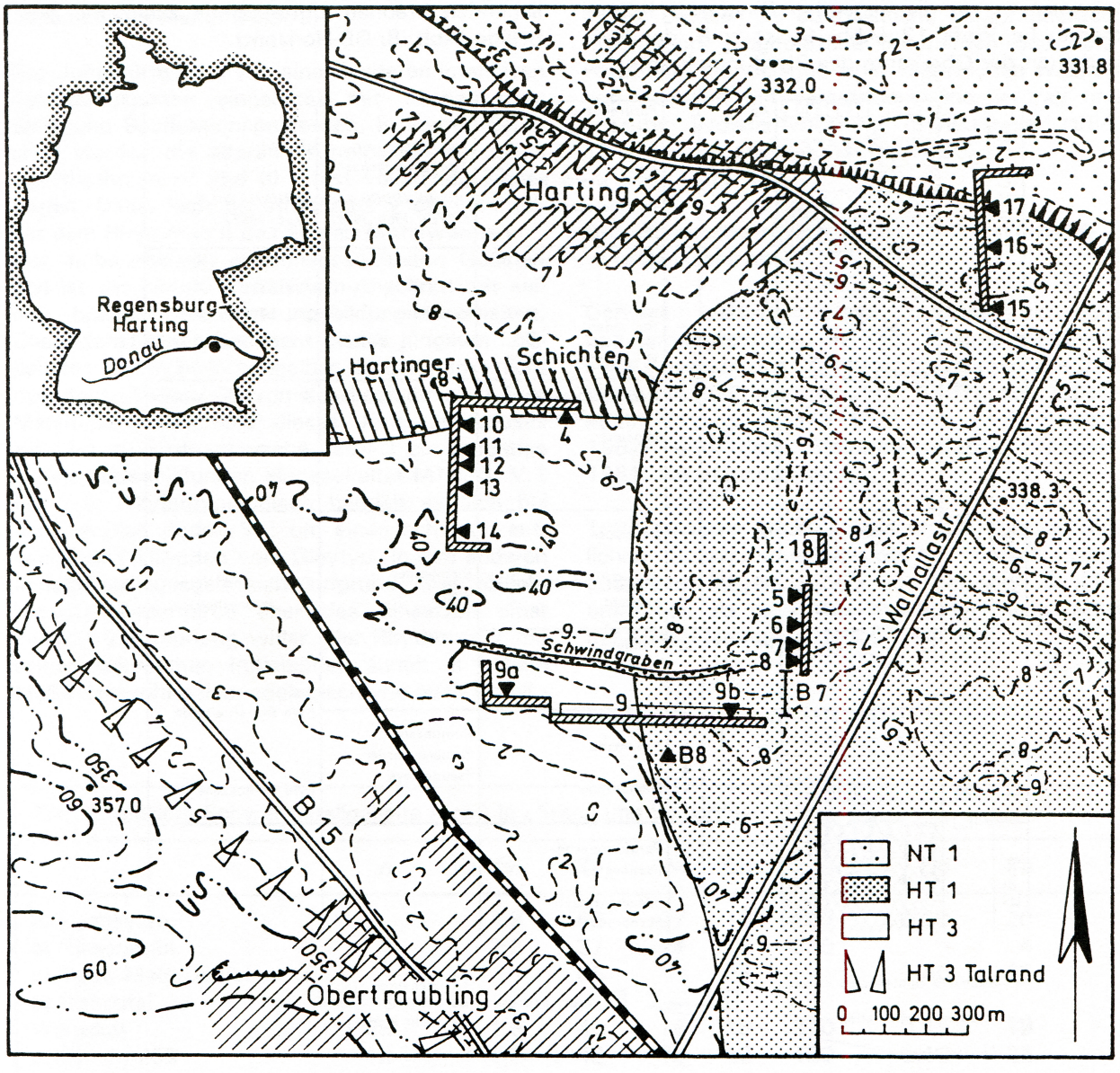

Abb. 2: Lage der untersuchten Profilstandorte (arabische Ziffern) an den verschiedenen Aufschlußwänden (Balkenschraffur) im Raum Regensburg-Harting.

Es sind vor allem solifluidale Umlagerungen, die den Rhythmus III einleiten. Insbesondere in den basalen Schichten sind daher häufig Fließerden aus vorverwitterten, tonreichen Sedimenten eingeschaltet (Abb. 8: Probe 118). Die bis zwei Meter mächtigen Lösse und tonreichen Fließerden des Rhythmus III wurden nach ihrer Ablagerung meist vollständig entkalkt, verbraunt und kryoklastisch verlehmt. Fettglänzende Ton-Fe-Auskleidungen der zahlreichen Nadelstichporen weisen darüberhinaus auf partielle pedochemische Tonneubildungen hin. Vor allem in Rinnen- und Dellenpositionen erreicht die Verlehmung ihre größte Tiefe und Intensität (SCHELLMANN 1988, Abb. 14, 15). In Profil 9b (Abb. 8), das in der Randsenke zur höhergelegenen HT3 aufgenommen wurde, erreichen die Tongehalte 37-46 Gew.%. Die Verwitterungstiefe beträgt dort mindestens 1,6 m. An anderen Profilstandorten reicht diese kräftige interstadiale Verwitterungsdynamik teilweise bis in die liegenden Rhythmus II-Sedimente. Im Profil 12 (Abb. 9) ist z. B. der Naßboden an der Oberkante des Rhythmus II entkalkt, verbraunt und verlehmt (NB- und unterlagernder Ckc-Horizont). Die hohen Tongehalte von 41 Gew.% sind weitgehend ein Ergebnis dieses tiefreichenden Verlehmungs- und Verbraunungsprozesses. Das Bildungsmilieu derartiger brauner Verwitterungshorizonte ist nicht näher bekannt (ROESCHMANN et al. 1982, 299f.). Da mit der kräftigen Entkalkung eine absteigende Bodenwasserlösung verbunden war, ist ein Fehlen oder zumindest eine sehr tiefe Lage des Dauerfrostbodens anzunehmen. Dieser braune Verwitterungshorizont wurde am Ausgang des Rhythmus III unter erneuten Dauerfrostboden-Bedingungen von einer Naßbodenphase überprägt. Vergleyungsprozesse, sowie intensive frostmechanische Beanspruchungen mit Verwürgungen, Frostblättergefüge und solifluidalen Fließfahnen erfaßten vor allem die hangenden Partien des braunen Verwitterungshorizontes (NG-Horizont). Als Ausdruck kräftiger Staunässe finden sich auf den Frostblättern des liegenden braunen Unterbodens zahlreiche Rostbeläge (Abb. 8: GB-Horizont).

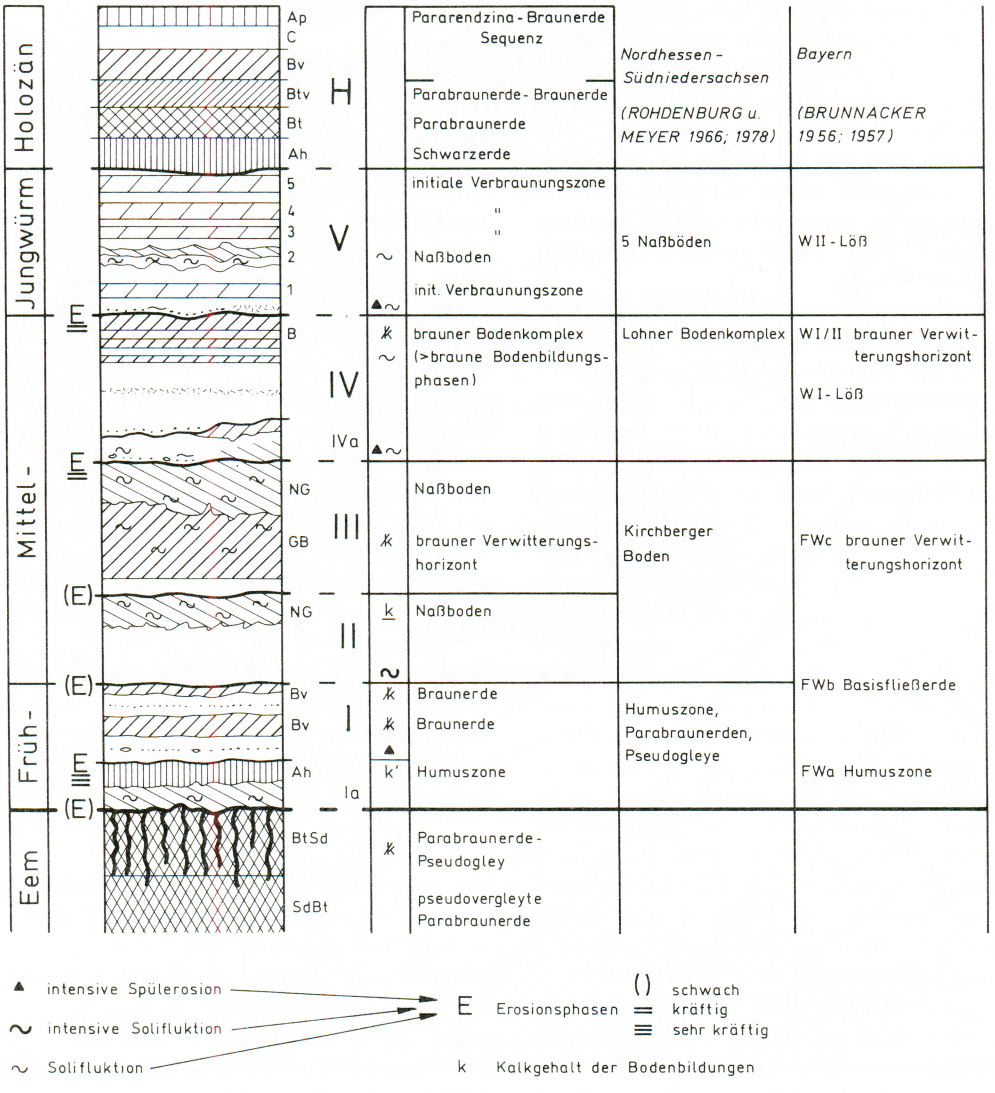

Abb. 3: Stratigraphische Gliederung der Würmlösse im Donautal (NG = Naßboden vom Gleytyp; 1-5 = initiale Bodenbildungen im Rhythmus V).

Diese Naßbodenphase leitet über zum Rhythmus IV. Er setzt mit einer ausgeprägten Spül- und Solifluktionsphase ein. Als Ausdruck dieser morphodynamischen Aktivitätszeit finden sich an der Basis des Rhythmus IV sandige, z.T. auch kiesige Spülsedimente (Abb. 9). Auch im hangenden Rhythmus IV-Löß sind immer wieder rötlichbraune Fließerdehorizonte eingeschaltet. Den Abschluß bildet ein rötlichbrauner bis dunkelbrauner Bodenkomplex. Im Profil 12 sind drei aufeinanderfolgende Bodenbildungsphasen erhalten, die jeweils eine Entkalkung und Verlehmung der betroffenen Löß- und Fließerdehorizonte bewirkten. Die Tongehalte erreichen in den einzelnen B-Horizonten 22-28 Gew.%. In diesem Bodenkomplex ist die letzte bedeutende Wärmeschwankung des Mittelwürm-Abschnittes manifestiert. Er ist daher zeitlich dem Denekamp-Interstadial gleichzusetzten und paläopedologisch mit dem österreichischen Stillfried B bzw. mit dem hessischen Lohner Boden zu korrelieren (Abb. 3).

Das Jungwürm wird von einer weiteren intensiven Abtragungsphase eingeleitet mit flächenhaften Spül- und Solifluktionsprozessen. In weiten Bereichen werden die älteren Würmlösse - vor allem der Rhythmen IV und III - fast vollständig abgetragen. Daher liegt der Rhythmus V oft unmittelbar dem Rhythmus II des älteren Mittelwürms auf. Nur in besonderen erosionsgeschützten Gunstlagen ist der höhere Mittelwürm-Abschnitt mit seinen braunen Verwitterungsbildungen erhalten. Charakteristisches Sediment dieses jüngsten Lößpaketes ist ein hellbraungelber, in der Regel nicht pseudovergleyter Löß von durchschnittlich 1,5 m Mächtigkeit. Innerhalb dieses Jungwürm-Lösses sind bis zu fünf schwache, 20-40 cm mächtige initiale Bodenbildungen eingeschaltet (Abb. 3: V,1 bis V,5). Bodentypologisch handelt es sich bei dem zweiten Boden V,2 um einen schwach entwickelten Naßboden vom Gleytyp. In den anderen Initialböden spiegelt sich aufgrund ihrer rötlichbraunen Bodenfarbe eher das Einsetzen einer initialen Verbraunung wider. Der Rhythmus V mit seinen schwachen Initialböden ähnelt in hohem Maße - sowohl paläopedologisch wie auch faziell - entsprechenden Jungwürmabfolgen in benachbarten Lößgebieten (zur Korrelation vgl. Abb. 3; ausführlich in SCHELLMANN 1988: 166ff.)

Die heutigen, holozänen Oberflächenböden haben sich in der Regel auf dem weitflächig verbreiteten Rhythmus V-Löß entwickelt. Da auf den von Bodenerosion stärker betroffenen Kuppen- und Dellenrandlagen der Rhythmus V-Löß weitgehend abgetragen ist, erfaßt dort die heutige Bodenentwicklung ältere Würmlösse und Innerwürmböden. Bodentypologisch sind dort vor allem Pararendzinen und Braunerden verbreitet. Dagegen finden sich auf den bodenerosiv geringer betroffenen Flächenarealen rötlichbraune Parabraunerden (Abb. 4; Tab. 3). In Dellenpositionen sind z.T mächtige Kolluvialfüllungen verbreitet. In und an der Basis dieser Kolluvien sind ältere holozäne Bodenbildungen begraben (Abb. 5: frühholozäne Schwarzerden, alt- bis mittelholozäne Parabraunerden, bronze- bis eisenzeitliche Parabraunerden-Braunerden, jungholozäne Braunerden und Pararendzinen). Sie belegen einen mehrfachen Wechsel von Perioden mit verstärktem Bodenabtrag und erneuter Bodenentwicklung (SCHELLMANN 1988, 151ff.; SCHELLMANN & RADTKE 1990).

5. Schwermetallverteilungen in den Würmlöß-Deckschichten

Generell besitzen Lösse niedrige natürliche Schwermetallgehalte. In Tab. 2 sind entsprechende Analysen von Löß bzw. Lößlehmen aus dem Donautal, Südbayern (RUPPERT 1987), dem Kaiserstuhl (TAYLOR et al. 1983, zit. nach RUPPERT 1987) und dem Rhein-Main-Gebiet (MAQSUD 1981) zusammengestellt.

Trotz gewisser Unterschiede in der durchschnittlichen Schwermetallführung der verschiedenen Lößgebiete liegen die Gehalte bei allen deutlich unter den als tolerierbar erachteten Richtwerten der Klärschlammverordnung (Tab. 1).

Tab. 2: Mittlere Schwermetallgehalte (ppm) in Lössen und Lößlehmen

	n	Fe (%)	Zn	Ni	Cu	Mn	Cd	Pb
a) Südbayern		3,8	60	27	18	600	0,20	20
b) Kaiserstuhl	2	2,2	37	24	14	530	-	4
c) Rhein-Main-Gebiet		-	66	43	22	-	0,40	35
d) Donautal								
Würmlöß	28	1,6	40	18	13	370	0,15	19
Jungwürmlöß	18	1,6	42	19	13	400	0,10	22

Quelle: a) Ruppert 1987, b) Taylor et al. in Ruppert 1987, c) Maqsud 1981, d) eigene Untersuchungen

5.1. Holozäne, eemzeitliche und ältere Warmzeitböden

Die profildifferenzierende Lessivierungsdynamik heutiger Oberflächen-Parabraunerden wirkt sich deutlich auf die vertikale Verteilung der Schwermetalle Eisen, Zink und Nickel aus. Das Bodenprofil B8 (Abb. 4) wurde bei Regensburg-Harting (Abb. 2) beprobt. Es zeigt eine Parabraunerde mit schwach saurer Bodenreaktion, wie sie auf Löß im Donautal weit verbreitet ist. Den Anreicherungen der Elemente Fe, Zn und Ni im Bt-Horizont steht ein deutlicher Rückgang zum hangenden A-Horizont gegenüber. Bei Erniedrigung des pH-Wertes gegen pH 6 - wie bei der Löß-Parabraunerde im Profil "Straubing-Alburg" erfaßt (Tab. 3) - ist Ni noch markanter aus dem Oberboden bis in den Bt-Horizont verlagert worden. Generell verhalten sich Fe, Zn und Ni in ihrer Tiefenfunktion in etwa parallel zum Tongehalt. Im Profil "Straubing-Alburg" (Tab. 3) besitzt auch Cr diese Neigung. Weitgehend unverändert sind die Gehalte von Pb und Cu. Sie liegen im Bereich der natürlichen Schwankungsbreite des unverwitterten Lösses (Tab. 2). Lediglich im Profil "Straubing-Alburg" sind im Ap-Horizont die Pb-Gehalte mit 30 ppm - wohl anthropogen bedingt - geringfügig erhöht.

In der Tiefenfunktion der Mn-Gehalte zeigen sich häufig zwei Konzentrationsmaxima (Abb. 4, 5). Ein erstes tritt im humosen Oberboden auf, ein zweites im tieferen Bereich des Bt-Horizontes. Die Anreicherung von Mn im humosen Oberboden dürfte eine Folge der Aufbringung entsprechend Mn-haltiger Düngemittel (ENDER 1986, 14) oder Klärschlämme sein. Das zweite Maximum resultiert aus einem Eintrag dieses leicht mobilisierbaren Elementes vor allem über Sickerwässer. Daher finden sich in Muldenpositionen mit ihrer erhöhten Wasserperkolation häufig extrem erhöhte Mn-Gehalte. Im Profil B7 (Abb. 5), das in einem Dellentälchen auf der HT3 bei Regensburg-Harting (Abb. 2) beprobt wurde, findet sich neben dem ersten oberflächennahen, wohl anthropogen bedingten Mn-Maximum ein weiteres im basalen Bereich der Kolluvialfüllung. Innerhalb der dort als Stauhorizont fungierenden, stark tonigen Schwarzerde-Parabraunerde des Altholozäns liegen die Mn-Gehalte zwischen 1.600-2.400 ppm. Der fossilen, nur schwach lessivierten und daher durchlässigeren Braunerde (Abb. 5: fBtv-Horizont) fehlt dagegen diese hydromorphe Anreicherung von Mn im Unterboden.

Cd ist sowohl innerhalb der Oberflächenböden wie auch in der fossilen Schwarzerde-Parabraunerde (Abb. 4, 5) mit Gehalten um 0,2-0,3 ppm gegenüber 0,15 im unverwitterten Löß geringfügig erhöht. Da Cd ebenso wie Zn und Ni zu den leicht verlagerbaren Schwermetallen zählt (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1989, 318ff.), sind die höheren Gehalte im Bt- (Abb. 4) bzw. fAhBt-Horizont (Abb. 5) wohl ebenfalls eine Folge pedogener Anreicherung im Zuge der Lessivierungsdynamik. Eine Folge anthropogener Einträge (Düngemittel, Klärschlämme, atmosphärische Deposition) ist der nahe der Bodenoberfläche in 10-35 cm (Abb. 4) bzw. in 10-60 cm Tiefe (Abb. 5) auftretende Anstieg der Cd-Gehalte auf z.T. über 3 ppm.

Wie in Abb. 6 erfaßt, sind im Bt-Horizont der eemzeitlichen Parabraunerden alle untersuchten Schwermetalle bis auf Pb pedogen deutlich angereichert. Derartige tonangereicherte Unterbodenhorizonte sind im Donautal unter Würmlöß häufig an der Schotteroberkante der älteren Hochterrassen erhalten. Die vertikale Verteilung aller Schwermetalle verläuft bis auf Pb annähernd parallel zu den Tongehalten. Auch Cu ist in der eemzeitlichen Parabraunerde - im Gegensatz zur heutigen Parabraunerde auf Löß (Abb. 4, Tab. 3) - im Zuge der Lessivierung verlagert worden. Die sehr geringen Pb-Gehalte zeigen wiederum nur minimale, evtl. allein meßtechnisch bedingte Schwankungen. Die absoluten Gehalte aller Schwermetalle liegen tendenziell deutlich niedriger als in den holozänen Bt-Horizonten auf Löß. Die Ursache liegt in den hohen Sandanteilen von 55-73 Gew.% bei den Schotter-Parabraunerden gegenüber 2-6 Gew.% bei den Löß-Parabraunerden. Da Sande vorwiegend aus extrem schwermetallarmen Quarzkörnern bestehen, wirken sich hohe Sandgehalte "verdünnend" auf die Schwermetallführung aus.

Tab. 3: Schwermetallgehalte einer holozänen Parabraunerde auf Jungwürmlöß bei Straubing-Alburg

Horizonte	n	Tiefe (cm)	pH	Kalk (%)	Fe (%)	Zn (ppm)	Ni (ppm)	Mn (ppm)	Pb (ppm)	Cr (ppm)	Ton (Gew.%)	Sand (Gew.%)
Ap	1	20	6	0	1,8	36	11	710	30	46	10	11
Al	1	45	6,1	0	2,2	34	15	620	12	56	21	5
AlBt	1	60	6,3	0	2,5	37	16	490	10	59	27	5
Bt	2	100	6,6	0	3,4	49	29	480	11	64	33	3
Cv	1	105	7,5	12,3	2,3	34	21	420	11	55	21	10
C	1	130	7,6	24,1	2	29	19	380	14	46	16	11

humoser Oberboden

a) schwach verbraunter Unterboden

b) intensiv

a) schwach Oxidationshorizont

b) intensiv

a) schwach Reduktionshorizont

b) intensiv

tonangereicherter Unterboden

a) Lößkindl

b) Kalkkrusten

Fließerde

Legende zu den Abbildungen 4 bis 10

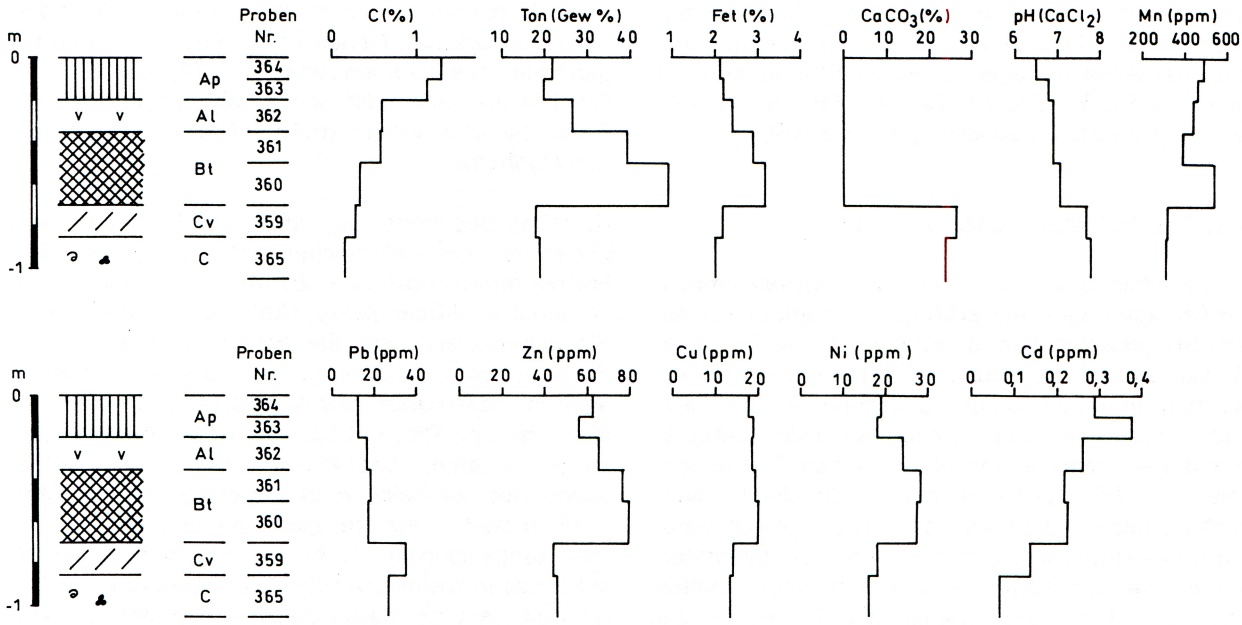

Abb. 4: Schwermetallverteilungen in einer Oberflächen-Parabraunerde auf Würmlöß bei Regensburg-Harting (Profil B8 in Abb. 2)

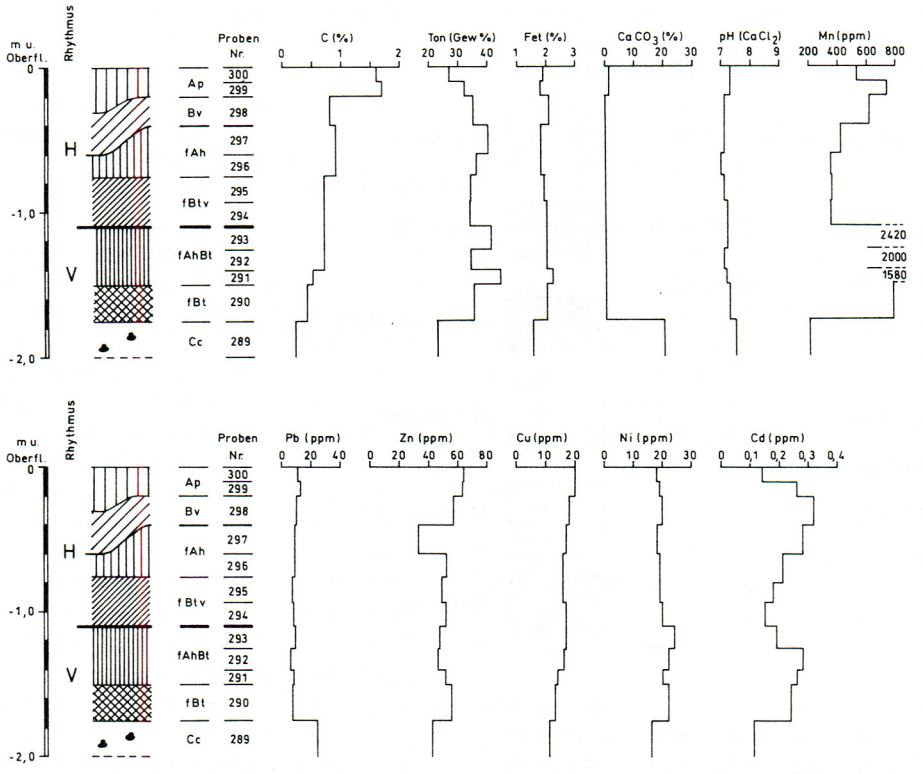

Abb. 5: Schwermetallverteilungen holozäner Bodenchronosequenzen innerhalb einer Dellenfüllung bei Regensburg-Harting (Profil B7 in Abb. 2)

Auch die Bt-Horizonte von fünf älteren präholozänen Parabraunerden auf Lößfließerden, wie sie im Profil "Dunk" bei Straubing (Abb. 2) aufgeschlossen sind, zeigen neben der Tonanreicherung deutliche pedogen bedingte Erhöhungen der Elemente Fe, Zn und Ni (Tab. 4). Pb und auch Cr wurden von der Lessivierung nicht erfaßt.

5.2. Das Frühwürm, Lößrhythmus I

Kennzeichen des Frühwürms sind Phasen intensiver Umlagerungen mit kräftiger Abtragung auf der letztinterglazialen Landoberfläche. Diese Erosionsphasen wurden von kräftigen Interstadialen unterbrochen, in denen es zur Ausbildung von schwarz- und braunerdeartigen Waldböden kam. Entsprechend herrschen in morphologischen Tiefpositionen des frühwürmzeitlichen Paläoreliefs sandreiche Spülsedimente vor, auf denen - wie in Abb. 7 erfaßt - Unterbodenhorizonte von z.T. gebänderten Braunerden (BBv-Horizont) reliktisch erhalten sind. Die Ton- und ebenso die Schwermetallgehalte entsprechen hinsichtlich der Spülsedimente weitgehend den niedrigen Gehalten der sandigen Matrix des Hochterrassenschotters. Erst im oberen Bereich des Rhythmus I nehmen der Schluff- und Tongehalt und ebenso die Fe- und Zn-Gehalte zu. Die Gehalte von Fe, Mn, Zn, Cu, Ni und Cd sind im BBv- und GoCkc-Horizont nur wenig erhöht. Im GoCkc-Horizont ist die grundwasserbedingte Fe-Anreicherung auch makroskopisch anhand einer millimeterbreiten Rostbänderung erkennbar. Neben Fe kam es wohl auch zu geringen Ausfällungen von Mn, Zn, Cu, Ni und Cd. Die nur sehr reliktisch erhaltenen Frühwürm-Böden besitzen weder erhöhte Ton- noch Schwermetallgehalte.

Korrelate Sedimente der intensiven Umlagerungen bilden in morphologischen Hochpositionen des Frühwürm-Paläoreliefs 20-40 cm mächtige, karbonatgeröllfreie Kiese (Abb. 6: SM-Horizont). Sie lagern diskordant der gekappten Pseudogley-Parabraunerde des Eems auf, greifen teilweise auch in Frostspalten und Kryoturbationstaschen in diese hinein. Diese Kiesschicht besteht aus der aufgearbeiteten Grobmatrix des Eem-Bodens sowie aus zahlreichen zentimetergroßen Fe-Mn-Konkretionen. Letztere stammen aus dem ebenfalls umgelagerten SwAl-Horizont der sekundär stark pseudovergleyten Eem-Parabraunerde. Während die sandige Matrix dieser Kiesschicht extrem niedrige Schwermetallgehalte besitzt, sind in den Konkretionen in hohem Maße Fe und Mn angereichert. Sie besitzen im Mittel folgende Elementverteilungen: Fe 9,45%, Mn 10.500 ppm, Zn 52 ppm, Pb 48 ppm, Cr 46 ppm, Ni 22 ppm.

5.3. Das Mittelwürm, Lößrhythmen II bis IV

Mit Beginn des Mittelwürms herrscht die äolische Sedimentation von Löß vor. Anhand zweier kräftiger Erosionsphasen und dreier interstadialer Wärmeschwankungen mit unterschiedlichen Bodenbildungen kann der Mittelwürmlöß im Donautal weiter unterteilt werden in die Lößrhythmen II bis IV (Abb. 2). Lößrhythmus II endet mit der Ausbildung eines kräftigen Naßbodens vom Gleytyp (Abb. 8: NG-Horizont), Rhythmus III mit einem stark verlehmten braunen Verwitterungshorizont, der anschließend von einer Naßbodenphase überprägt wurde (Abb. 8: NG- und GB-Horizont) und Rhythmus IV mit einem mindestens dreigliedrigen braunen Bodenkomplex (Abb. 9: Bv1 bis fBv3).

Tab. 4: Schwermetallgehalte von fünf älteren präholozänen Parabraunerden bzw. Pseudogley-Parabraunerden auf Lößfließerden im Profil "Dunk" (Lage siehe Abb. 2)

Horizonte	n	pH	Kalk (%)	Fe (%)	Zn (ppm)	Ni (ppm)	Pb (ppm)	Cr (ppm)	Ton (Gew.%)	Sand (Gew.%)
Bt-,SdBt-Horizonte	12	5,2	0	3,4	46	21	23	25	38	8
Lößfließerden (SwM-Horizonte)	6	5,2	0	2,7	28	11	25	21	22	15

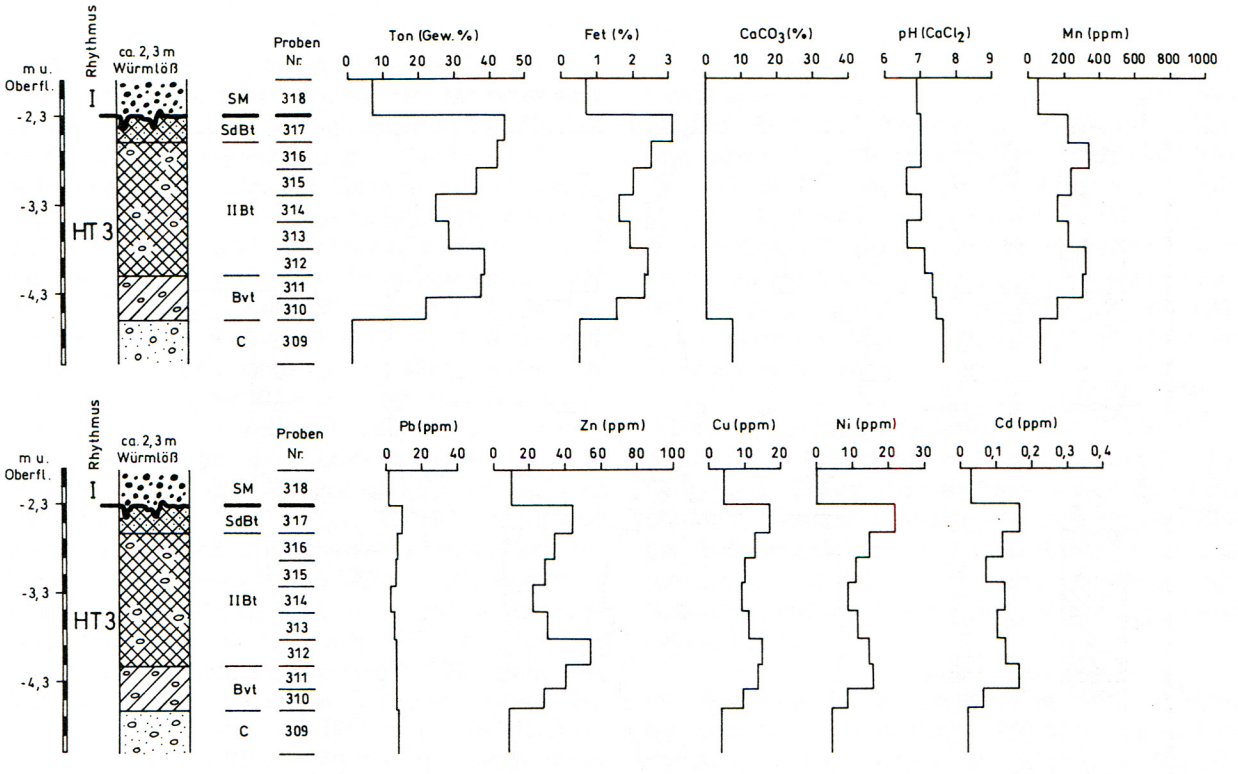

Abb. 6: Schwermetallverteilungen im Bt-Horizont einer fossilen, eemzeitlichen Schotterparabraunerde auf der HT3 bei Regensburg-Harting (Profil 9a in Abb. 2)

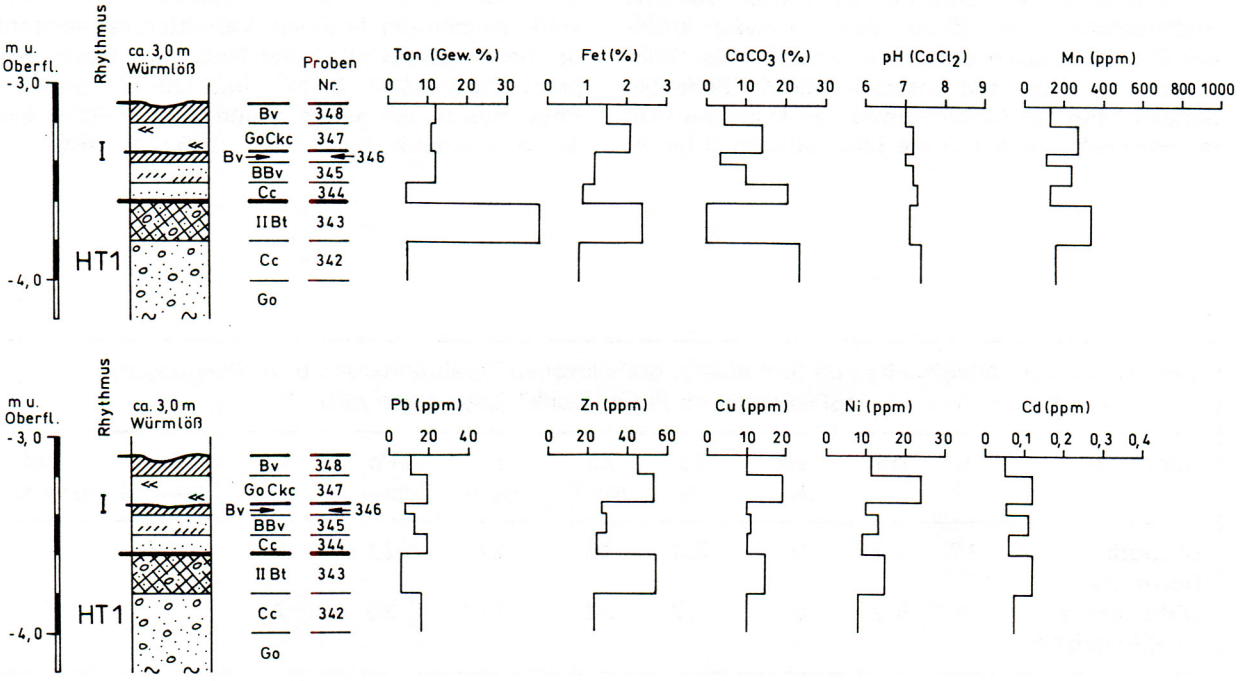

Abb. 7: Schwermetallgehalte frühwürmzeitlicher Spülsedimente und ihrer Bodenbildungen (Lößrhythmus I; Profil 7b in Abb. 2)

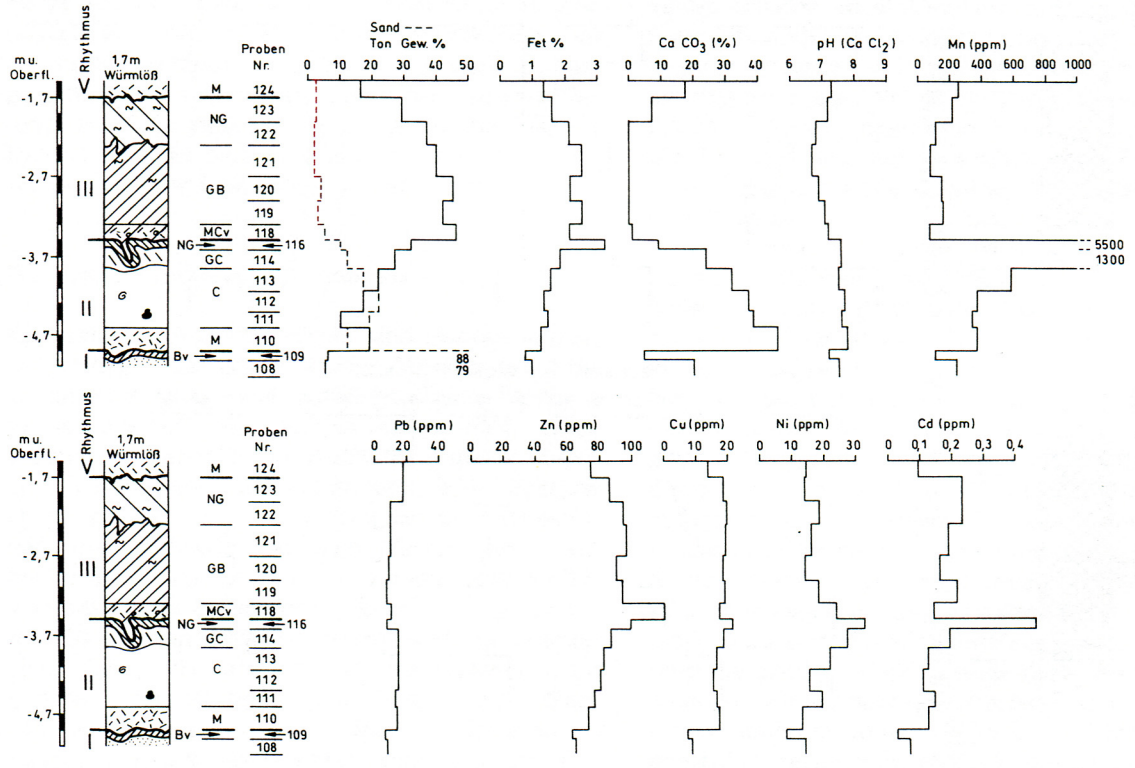

Abb. 8: Schwermetallverteilungen im Lößrhythmus II und III (Profil 9b in Abb. 2)

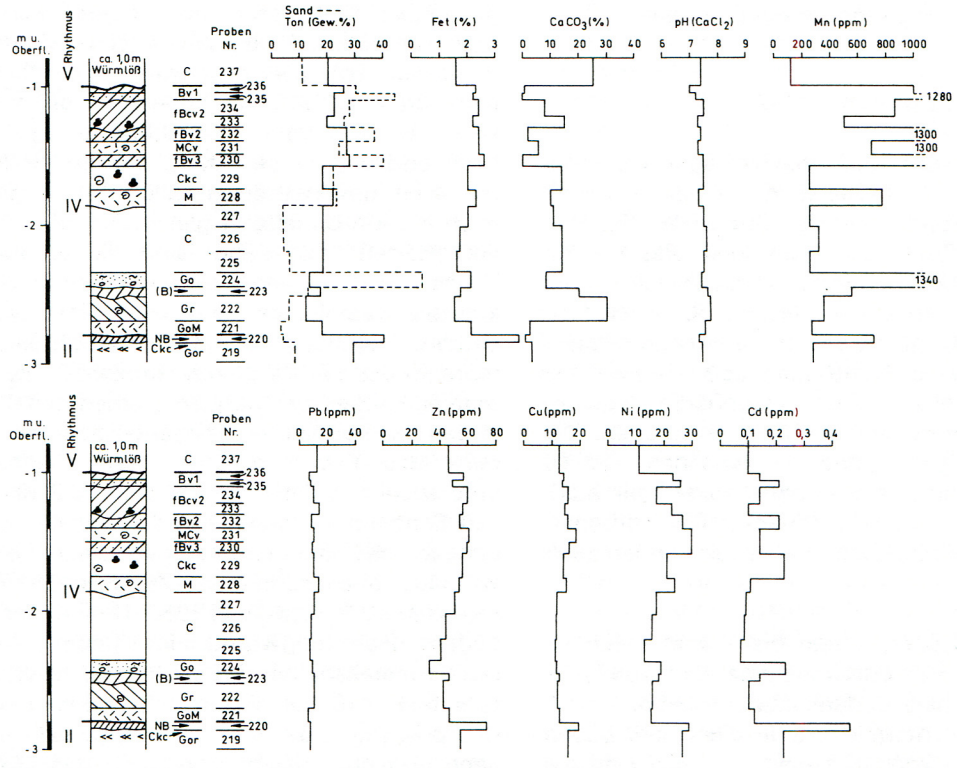

Abb. 9: Schwermetallverteilungen in Lößrhythmus IV (Profil 12 in Abb. 2)

Die Fe- und Zn-Gehalte orientieren sich auch hier in allen drei Lößrhythmen in hohem Maße an den geogen und pedogen bedingten Unterschieden der Korngrößenzusammensetzung. Generell finden sich niedrige Fe- und Zn-Gehalte in den sandreichen und tonärmeren Lößsedimenten, während die verbraunten und verlehmten Bodenhorizonte der Rhythmen III und IV mit ihren höheren Schluff- und Tongehalten überdurchschnittlich hohe Fe- und Zn-Werte erreichen (Abb. 8, 9). Die Pb- und Cu-Gehalte liegen dagegen in allen Horizonten meist deutlich unter 20 ppm, sind also ohne signifikante Anreicherungen. Auffällige Konzentrationen zeigen dagegen die leichter löslichen Elemente Mn, Cd und Ni. Sie sind in fast allen primär oder sekundär durch Stau- bzw. Grundwassernässe überprägten Horizonten stärker angereichert. Im Naßboden des Rhythmus II (Abb. 8: NG-Horizont) ist neben Mn, Cd und Ni auch Zn und Fe stark angereichert. Hier finden sich die höchsten im Würmlöß auftretenden Mn- (bis 5.500 ppm), Cd- (0,5 ppm) und Ni-Gehalte (32 ppm) sowie die zweithöchsten Zn-Gehalte (99 ppm). Die höchsten Zn-Gehalte von 120 ppm treten unmittelbar oberhalb des nur reliktisch erhaltenen Naßbodens in der diskordant auflagernden Fließerde des Rhythmus III auf. Anscheinend besteht diese schwach verbraunte Fließerde in hohem Maße aus Naßboden-Kolluvien. Im Profil 12 (Abb. 9) ist der Rhythmus II-Naßboden noch von der intensiven braunerdeartigen Verwitterung des Rhythmus III-Interstadials entkalkt, verbraunt und verlehmt worden (Abb. 9: NB-Horizont). Infolgedessen besitzt dieser Horizont etwas höhere Tongehalte (41 Gew.%) als der Rhythmus II-Naßboden im Profil 9b (Abb. 8). Neben stark erhöhten Fe- (3,8%) und Zn-Anteilen (73 ppm) sind wiederum Mn, Ni und Cd hydromorph stark angereichert. Ihre absoluten Gehalte sind nahezu identisch mit den Mn-, Ni- und Cd-Gehalten des Rhythmus II-Naßbodens im Profil 9b (Abb. 8).

Während die Naßbodenbildung des Rhythmus II ausgeprägte Anreicherungen von Mn, Cd, Ni, Zn, Fe bewirkte, führte die Naßbodenüberprägung des braunen Verwitterungshorizontes in der sehr tonigen Bodenmatrix zu keinen signifikanten Anreicherungen. Dort findet sie sich als konkretionäre Anreicherung auf den Frostblättern (Abb. 8: NG- und GB-Horizont).

Im Rhythmus IV zeigen sich in den sekundär hydromorph überprägten Horizonten ebenfalls deutliche Anreicherungen, vor allem von Mn, Cd und Ni (Abb. 9). Sowohl im liegenden Go-Horizont wie auch im hangenden, sekundär pseudovergleyten braunen Bodenkomplex sind vor allem die Mn-, untergeordnet auch die Cd- und Ni-Gehalte deutlich erhöht. Die höchsten Mn-Gehalte von rd. 1.300 ppm treten hier in den grobporenreichen

sandigen Lagen auf. Fe und Zn folgen wiederum primär den Substratänderungen. Die Pb- und Cu-Gehalte zeigen nur geringe Veränderungen.

5.4. Jungwürm, Lößrhythmus V

Das Jungwürm setzt mit einer kräftigen Erosionsphase mit Wiederbelebung von Dellen (Spülerosion) und solifluidalen Prozessen ein. Von den älteren Würmlössen hebt sich dieser jungwürmzeitliche Lößrhythmus V nicht nur durch diese markante Erosionsdiskordanz ab. Auch faziell unterscheidet er sich von ihnen durch seine hellere, braungelbe Farbtönung sowie durch das weitgehende Fehlen einer sekundären Pseudovergleyung in Form von Fe-Mn-Konkretionen. Die Tongehalte liegen generell zwischen 12-18 Gew.%, während der Sandanteil lokal sehr stark zwischen 3-41 Gew.% schwankt. Die Karbonatgehalte liegen bei 20-32%, vereinzelt können auch 40% auftreten.

Der im Mittel 1,5 m, selten bis 2,5 m mächtige Jungwürm-Löß wird durch maximal fünf 20 bis 40 cm mächtige initiale Bodenbildungen (Abb. 2: V,1 bis V,5) weiter untergliedert. In allen Initialböden ist weder der Kalkgehalt erniedrigt, noch sind die Ton- oder Eisengehalte gegenüber dem unverwittertem Löß signifikant höher. Lediglich im Profil 18 (Abb. 10) sind in diesen Horizonten die Mn-Gehalte etwas erhöht. Sie liegen bei ca. 600 ppm gegenüber 350 ppm im umgebenden unverwitterten Lößrhythmus V. Als lokale Variante sind in diesem Profil aber gleichzeitig auch die Sandgehalte stark erhöht. An anderen Profilstandorten, wie z.B. im Profil "Straubing-Alburg", ist die Kornverteilung in den Jungwürmböden identisch mit dem unverwitterten Löß. Dort liegen dann auch die Mn-Gehalte in gleicher Höhe wie im unverwitterten Löß. Daher sind die erhöhten Mn-Werte in den Bodenhorizonten im Profil 18 als sekundäre Ausfällungen aus dem Sickerwasser zu deuten, begünstigt durch den erhöhten Grobporenraum der sandreicheren Horizonte. Die leichten Schwankungen der übrigen Elementgehalte liegen in den Initialböden im lithogenen Schwankungsbereich des unverwitterten Lösses. Anhand der untersuchten Elemente zeigt sich, daß die lithogenen Schwermetallgehalte in den initialen Bodenbildungen des Jungwürms mit denen im Jungwürmlöß übereinstimmen. Zu gleichen Ergebnissen kommt SCHERELIS (1988, 164f.), der 8 Naßböden des Jungwürms im Raum Heidelberg schwermetallanalytisch bearbeitete. Er stellt ebenfalls fest, daß bei diesen schwachen pedogenen Überprägungen die Schwermetallgehalte entscheidend von der Zusammensetzung des Lösses abhängig sind.

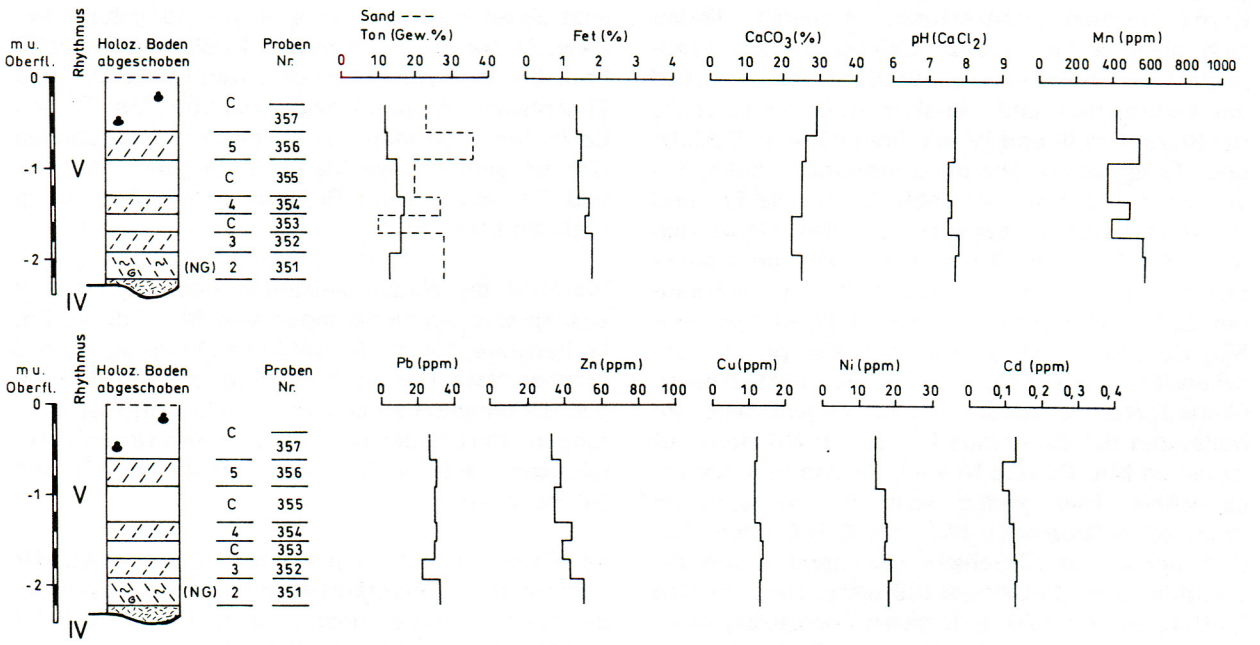

Abb. 10: Schwermetallverteilungen im Lößrhythmus V (Profil 18 in Abb. 2)

6. Ergebnisse und Diskussion

Der unverwitterte Würmlöß besitzt im Donautal ebenso wie in anderen deutschen Lößgebieten im Mittel nur geringe Gehalte von Fe, Zn, Ni, Cu, Mn, Cd und Pb (Tab. 2). Hohe Korngrößenanteile von quarzreichen und damit schwermetallarmen Sanden wirken sich zusätzlich noch verdünnend auf die Schwermetallführung aus. Insbesondere in den sehr sandreichen Sedimenten des Löß-rhythmus I finden sich daher sehr niedrige Schwermetallgehalte.

Weitgehend unbeeinflußt von lithogenen und pedogenen Faktoren sind die fast konstanten Pb- und Cu-Gehalte der Würmlösse. Dagegen folgen die Fe- und Zn-Anteile vor allem den schwankenden Tongehalten. Entsprechende erhöhte Konzentrationen finden sich deshalb in tonreichen Fließerden und in den verbraunten und verlehmten Bodenhorizonten der kräftigen Interstadialböden der Rhythmen III und IV. Die Zn-Gehalte können dort 100 ppm überschreiten. Sie liegen damit aber immer noch deutlich unter dem Grenzwert der Klärschlammverordnung für Zn von 200 ppm (Tab. 1).

Eine vertikale Verlagerung von Schwermetallen ist bei den braunen Interstadialböden nicht feststellbar. Erst im Zuge der Lessivierungsdynamik holozäner und älterer interglazialer Parabraunerden ist sie nachweisbar. In Abhängigkeit vom pH-Wert und von der Intensität der Tonverlagerung führte sie zu deutlichen Konzentrationen verschiedener Elemente in den tonangereicherten Bt-Horizonten. In den holozänen Parabraunerden zeigen sich bei pH-Werten zwischen 6-6,5 vor allem Verlagerungen von Fe, Zn, Ni sowie im Profil "Straubing-Alburg" auch von Cr. Obwohl Cd bereits bei pH-Werten unter 6,5 zunehmend löslicher wird (u.a. SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1989, 311), ist es in den Bt-Horizonten nur gering angereichert. Nach HERMS & BRÜMMER (1984) können jedoch auch bei saurer Bodenreaktion hochmolekulare organische Substanzen eine relativ starke Festlegung von Cd bewirken. Unbeeinflußt von der holozänen Lessivierungsdynamik sind die Elemente Pb und Cu.

In den eemzeitlichen und älteren interglazialen Bt-Horizonten sind bis auf Pb alle untersuchten Elemente deutlich erhöht. Entsprechend ihrer generellen Löslichkeitsabfolge ist neben Ton und Fe, Zn > Ni >> Cd, Cu und Cr pedogen angereichert. In den Grundtendenzen unterscheiden sich die vertikalen Elementverteilungen von fossilen und rezenten Parabraunerden nicht (ebenso: SCHERELIS 1989, 169). Unterschiede in den absoluten Gehalten resultieren vor allem aus variierenden primären Korngrößenspektren.

Neben der pedogen Freisetzung von Schwermetallen im Zuge der bodenbildenden Prozesse Verbraunung und Verlehmung kommt es im Zuge einer Lessivierung auch zu vertikalen Verlagerungen. Ebenso können Sicker- und Grundwässer vertikale, aber auch laterale Verlagerungen von Schwermetallen bewirken. Neben Fe und Zn werden davon verstärkt die leichter löslichen Elemente Mn > Cd > Ni erfaßt. Daher finden sich in den durch Stau- oder Grundwasser überprägten Horizonten entsprechende hydromorphe Anreicherungen entweder in Form millimetergroßer Fe-Mn-Konkretionen oder als erhöhte Grundgehalte feinst verteilt in der grobporenreichen Feinmatrix. Verlagerungen und Anreicherungen von Schwermetallen durch Stau- und Sickerwässer finden dabei nicht nur unter warmzeitlichen Klimabedingungen statt. In bestimmten Phasen traten sie verstärkt auch innerhalb der Würmkaltzeit auf. Go-gebänderte Spülsedimente und die vergleyten Horizonte der Naßböden belegen eindeutig deren syngenetisch entstandene hydromorphe Überprägung. Dagegen können die millimetergroßen Fe-Mn-Konkretionen, die vor allem in den älteren Würmlössen auftreten, auch postgenetischer Natur sein. Ausgeprägte syngenetische Anreicherungen im Zuge stauwasserbedingter Verlagerungen kennzeichnen vor allem den abschließenden Naßboden des Löß-Rhythmus II. Sie fehlen in dieser Deutlichkeit sowohl dem von einer Naßbodenphase überprägten braunen Verwitterungshorizont des Rhythmus III als auch den jüngeren, schwach entwickelten Naßböden. Zukünftig gilt es zu prüfen, inwieweit der Rhythmus II-Naßboden vergleichbare Schwermetallanreicherungen auch an anderen Standorten besitzt, diese Konzentrationen also als signifikantes paläopedologisches Leitmerkmal verwendet werden können. Darüberhinaus gibt es - wie auch SCHERELIS (1989) feststellt - keinerlei Hinweise, die es erlauben, interglaziale und interstadiale Paläoböden anhand ihrer im Totalaufschluß erfaßten Schwermetallgehalte pedostratigraphisch zu korrelieren.

Auf der Basis der natürlichen Grundgehalte des Würmlösses und seiner Interstadialböden lassen sich anthropogen bedingte Schwermetalleinträge ableiten. Sie beschränken sich in den wenigen untersuchten Oberflächenböden auf eine geringe Erhöhung der Cd- und Mn-Gehalte. Im Profil "Straubing-Alburg" ist auch der Pb-Gehalt anthropogen leicht erhöht. Dabei sind die anthropogenen Schwermetalleinträge weitgehend im humosen Oberboden fixiert worden. Eine Verlagerung in tiefere Bodenhorizonte ist, zumindest für Pb, infolge der schon in wenigen Dezimeter Bodentiefe zunehmend neutralen bis basischen pH-Bedingungen auszuschließen.

Insgesamt liegen die Schwermetallgehalte in allen untersuchten Lößprofilen von den natürlichen Grundgehalten her deutlich unter den Grenzwerten der Klärschlammverordnung. Auch die bisher stattgefundenen anthropogenen Einträge ändern im allgemeinen dieses Bild nicht. Pb erreicht, allein

lithogen bedingt, maximale Konzentrationen von 25-35 ppm. Cu besitzt keine ausgeprägten Anreicherungszonen. Die Gehalte schwanken zwischen 7-20 ppm. Ni und Mn erreichen pedogen bedingt mit 32 ppm bzw. 5.500 ppm die höchsten Gehalte im Naßboden des Rhythmus II, während die Zn-Gehalte tonreicher Fließerden 100 ppm überschreiten können. Die Cd-Gehalte liegen im Mittel unter 0,15 ppm und erreichen bei hydromorpher Anreicherung, wie im Naßboden des Rhythmus II, maximale Konzentrationen bis 0,5 ppm.

7. Danksagung

Wir danken Frau R. FORSTER-STRIEPLING, Geographisches Institut der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf für die Bereitstellung der Analyseergebnisse zu den Profilen "Straubing-Alburg" und "Dunk".

8. Literatur

BLUME, H.-P. (1990): Handbuch des Bodenschutzes. Bodenökologie und -belastung; vorbeugende und abwehrende Schutzmaßnahmen.- Landsberg.

ENDER, R. (1986): Schwermetallbilanzen von Lysimeterböden - am Beispiel der Elemente Vanadium, Chrom, Mangan, Eisen, Kobalt, Nickel, Cadmium, Blei. - Marburger Geogr. Schr., *102*; Marburg.

GABRIEL, D. & MAQSUD, N. (1985): Schwermetallgehalte von Böden im nördlichen Rheinhessen. Grundlegende Arbeitsverfahren und Maßnahmen zum Boden- und Umweltschutz. - Pollichia, *7*; Bad Dürkheim.

HERMS, U. & BRÜMMER, G. (1986): Einflußgrößen geogener und pedogener Faktoren für die weitere Belastung der Böden mit Schwermetallen. - Z. f. Pflanzenernährung, Bodenkde., *147*: 400-424; Weinheim.

KlärVO (1992): Novelle zur Klärschlammverordnung -AbfKlärV. Fassung des Bundesratbeschlusses vom 29.11.1991. - Drucksache 493/91, Deutscher Bundestag; Bonn.

KlärVO (1982): Klärschlammverordnung. - Bundesgesetzblatt, Jg. 1982, Bd. *1*: 734; Bonn.

KLOKE, A. (1980): Richtwerte '80: Orientierungsdaten für tolerierbare Gesamtgehalte einiger Elemente in Kulturböden. - Mitt. VDLUFA, H. 1-3: 9-11; Darmstadt.

KUNTZE, H. & HERMS, U. (1986): Bedeutung geogener und pedogener Faktoren für die weitere Belastung der Böden mit Schwermetallen. - Naturwissenschaften, *73*: 195-204; Heidelberg.

MAQSUD, N. (1981): Belastung und Verschmutzung der Oberflächengewässer im Vorderen Odenwald und in der Rhein-Main-Ebene. - Mitt. Polichia, *69*: 27-81; Bad Dürkheim.

MÜLLER, G. (1964): Methoden der Sediment-Untersuchung. Teil 1. - Stuttgart.

ROESCHMANN, G., EHLERS, J., MEYER, B. & ROHDENBURG, H. (1982): Paläoböden in Niedersachsen, Bremen und Hamburg. - Geol. Jb., *F 14*: 255-309; Hannover.

ROHDENBURG, H. & MEYER, B. (1979): Zur Feinstratigraphie und Paläopedologie des Jungpleistozäns nach Untersuchungen an südniedersächsischen und nordhessischen Lößprofilen. - Nachdruck von 1966 in: Landschaftsgenese und Landschaftsökologie, *3*: 1-89; Braunschweig.

RUPPERT, H. (1987): Natürliche Grundgehalte und anthropogene Anreicherungen von Schwermetallen in Böden Bayerns. - GLA-Fachberichte, *2*; München (Geol. Landesamt).

RUPPERT, H., SCHMIDT, F., JONECK, M., JERZ, H. & DREXLER, O. (1988): Schwermetallgehalte in Böden des Donautales. - GLA-Fachberichte, *4*; München (Geol. Landesamt).

SCHEFFER, F./ SCHACHTSCHABEL, P. (1989): Lehrbuch der Bodenkunde. - 12. Aufl.; Stuttgart (Enke Verl.).

SCHELLMANN, G. (1988): Jungquartäre Talgeschichte an der unteren Isar und der Donau unterhalb von Regensburg. - Inaug.-Diss. Univ. Düsseldorf.

SCHELLMANN, G. & RADTKE, U. (1990): Schwermetallgehalte holozäner Bodenchronosequenzen auf Löß des Niederbayerischen Dungaus östlich von Regensburg. - Acta Biol. Benrodis, *2*: 151-160; Düsseldorf.

SCHERELIS, G. (1989): Untersuchungen zur profildifferenzierten Variabilität der Schwermetalle Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn und Pb in rezenten und fossilen Parabraunerden Baden-Württembergs. - Stuttgarter Geographische Studien, *112*; Stuttgart.

SCHIER, W. (1985): Zur vorrömischen Besiedlung des Donautales südöstlich von Regensburg. - Bayerische Vorgeschichtsblätter, *50*: 9-75; München.

Anschriften:

Dr. Gerd SCHELLMANN, Seminar für Geographie und ihre Didaktik, Erziehungswissenschaftliche Fakultät, Universität zu Köln, Gronewaldstr. 2, D-5000 Köln

Prof. Dr. Ulrich RADTKE, Institut für Geographie und Geoökologie der Universität (TH) Karlsruhe, Kaiserstr. 12, D-7500 Karlsruhe 1

Manuskript eingegangen am 31.7.1992

Regensburg-Harting, Profil 9a

Nr.	Kalk	pH	Fe	Zn	Pb	Cu	Ni	Mn	Cd	S	gU	mU	fU	T
Av	%		%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	%	%	%	%	%
318	0	6,9	0,7	10	3	4	0	50	0,03	72,2	9,3	6,7	3,3	8,5
317	0	7	3	44	9	17	22	230	0,17	44,3	9,4	1,1	1,4	43,8
316	0	7	2,5	34	7	13	15	340	0,11	55	3,9	0,1	0,3	40,7
315	0	6,6	2	27	6	10	11	240	0,07	57,2	4,7	0,9	0,8	36,4
314	0	7	1,6	23	3	9	9	160	0,12	73,2	2,2	0	0	24,6
313	0	6,6	1,9	30	5	11	12	220	0,10	67,8	0,9	1,6	0,9	28,8
312	0	7,1	2,4	54	6	15	14	320	0,12	56,4	3,4	0,2	2,1	37,9
311	0	7,3	2,3	40	6	14	16	300	0,16	59,3	1,3	1	2,2	36,2
310	0	7,4	1,5	28	6	9	8	160	0,06	72,1	4,1	0,7	1,5	21,5
309	7,1	7,6	0,4	9	7	4	4	60	0,02	92,1	5	1,4	0,7	0,9

Regensburg-Harting, Profil 9b

Nr.	Kalk	pH	Fe	Zn	Pb	Cu	Ni	Mn	Cd	S	gU	mU	fU	T
Av	%		%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	%	%	%	%	%
124	17,1	7,3	1,4	75	18	14	14	250	0,10	2,6	48,5	25,5	7,1	16,3
123	7,3	7,2	1,6	86	18	19	14	220	0,23	2,6	27,3	29,5	11,7	29
122	0	6,8	2,1	95	10	20	19	110	0,23	2	26,3	23,6	10,8	37,3
121	0	6,7	2,5	97	10	19	16	80	0,19	2	19,5	25,3	13,8	39,4
120	0	6,9	2,1	91	9	18	14	150	0,16	4,1	13,4	24,6	11,9	45
119	0	7,1	2,5	94	7	19	18	160	0,21	3	17,7	25,9	11,3	42,1
118	0	7,2	2,1	121	10	18	24	70	0,14	4,8	13,8	23,7	11,8	46
116	9,3	7,6	3,2	99	7	21	32	5500	0,47	9,9	20,4	26,9	10,8	32
114	24,4	7,6	1,8	87	14	19	27	1300	0,19	11,8	27,6	23,8	10	26,8
113	32,2	7,5	1,5	83	14	16	22	580	0,12	16,9	30,3	21,5	9,9	21,4
112	36,9	7,7	1,3	80	14	15	15	370	0,11	22	35,9	19,4	5,5	17,2
111	38,7	7,6	1,4	76	12	16	19	350	0,15	19	43,5	18,8	5,7	13,1
110	46,3	7,8	1,2	73	13	17	13	370	0,12	12	18	36	14,7	19,3
109	4,5	7,2	0,7	63	5	7	8	110	0,03	87,7	3,6	2	1,1	5,6
108	20,3	7,5	0,9	64	7	8	13	250	0,07	78,8	11	5	0,1	5,1

Regensburg-Harting, Profil 18

Nr.	Kalk	pH	Fe	Zn	Pb	Cu	Ni	Mn	Cd	S	gU	mU	fU	T
Av	%		%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	%	%	%	%	%
357	29,3	7,6	1,4	33	26	12	15	420	0,1	22,4	41,9	15,5	8,2	12
356	23,5	7,6	1,5	37	30	11	15	550	0,1	41,2	25,7	11	7,9	14,2
355	25,7	7,5	1,5	34	29	12	17	370	0,12	20,3	45	15,3	4,5	14,8
354	25,5	7,6	1,7	44	30	13	18	490	0,12	26,9	32,7	16,8	7,2	16,5
353	22,5	7,5	1,6	39	29	14	17	400	0,12	10,2	55,7	14,7	3,2	16,2
352	22,3	7,8	1,8	43	22	14	19	570	0,13	28,1	34,8	16,3	5,2	15,6
351	24,4	7,7	1,8	51	32	13	18	590	0,13	28,2	40,5	17,7	4,7	12,9

Regensburg-Harting, Profil B7

Nr.	Kalk	pH	Fe	Zn	Pb	Cu	Ni	Mn	Cd	S	gU	mU	fU	T
Av	%		%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	%	%	%	%	%
300	0,3	7,3	1,9	64	11	20	18	530	0,14	3,7	17,9	30,2	21,1	27,1
299	0,3	7,3	1,8	63	13	20	19	770	0,26	3,7	18,4	28,7	16,9	32,3
298	0	7,1	2,1	57	10	18	20	620	0,32	1,5	14,3	28,4	20,6	35,1
297	0	7,1	1,8	33	9	17	18	420	0,28	2,6	16,6	27,3	13,7	39,7
296	0	7	1,8	52	9	16	19	350	0,21	3	25,8	22,7	12,4	36,1
295	0	7,1	1,9	49	7	16	19	360	0,18	3,6	28	23,7	11	33,7
294	0	7,2	2	52	8	17	20	350	0,15	4,4	26,9	24,1	11,2	33,4
293	0	7,2	2	47	9	17	24	2420	0,19	5,9	29,8	20,8	2,6	40,9
292	0	7,1	2	46	6	16	22	2000	0,28	4,9	30,9	22,6	7,7	33,8
291	0	7,2	2,2	51	8	14	20	1580	0,26	4,3	30,2	19,7	2	43,8
290	0	7,3	2	55	7	13	22	780	0,19	3,5	27,7	24,9	8,9	35
289	21,2	7,5	1,5	42	24	11	16	200	0,11	4,6	31,2	33,7	8	22,5

Regensburg-Harting, Profil B8

Nr.	Kalk	pH	Fe	Zn	Pb	Cu	Ni	Mn	Cd	S	gU	mU	fU	T
Av	%		%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	%	%	%	%	%
364	0	6,6	2,2	62	13	18	19	490	0,29	5,5	39,1	24,7	11	21,8
363	0	6,6	2,2	57	14	19	18	460	0,37	5,5	39	24,1	13,4	20
362	0	6,8	2,4	66	17	19	24	440	0,26	3,4	34,4	24,3	11,2	26
361	0	6,9	2,9	77	18	19	28	390	0,22	2,5	28,3	21,1	8,6	39,5
360	0	7,1	3,2	79	16	20	28	540	0,23	1,8	29,7	18,1	1,8	48,7
359	26,4	7,8	1,7	44	35	14	18	320	0,13	3,6	45,7	24	8,6	18,2
365	24	7,7	1,5	46	27	14	16	320	0,07	3,4	39,9	29,6	8,2	19,4

Regensburg-Harting, Profil 7b

Nr.	Kalk	pH	Fe	Zn	Pb	Cu	Ni	Mn	Cd	S	gU	mU	fU	T
Av	%		%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	%	%	%	%	%
348	4,3	7	1,5	45	11	10	11	130	0,05	64,3	14,8	8,3	0,6	12
347	14,1	7,2	2,1	53	19	19	24	260	0,12	30,2	42,9	12,6	2,9	11,5
346	3,8	7	1,1	27	8	10	10	110	0,06	75,2	8,5	4,4	0,4	11,5
345	10,9	7,2	1,2	29	12	11	13	220	0,1	58	21,3	8	0,2	12,5
344	20,6	7,3	0,9	24	19	10	9	130	0,06	66	21,1	8,2	0,2	4,6
343	0,1	7,3	2,4	54	6	15	14	320	0,12	56,4	3,4	0,2	2,1	37,9
342	24,3	7,4	0,8	23	16	10	8	160	0,08	66,1	18,2	8,3	2,2	5,2

Regensburg-Harting, Profil 12														
Nr.	Kalk	pH	Fe	Zn	Pb	Cu	Ni	Mn	Cd	S	gU	mU	fU	T
Av	%		%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	%	%	%	%	%
237	25,3	7,4	1,6	46	13	13	11	120		11,1	39,4	23,4	5,5	20,6
236	0,7	7	2,3	57	7	14	23	990	0,1	29,6	21	15,1	8	26,3
235	0	7,2	2,2	50	8	14	26	1280	0,14	43,6	13,8	12,5	7,7	22,4
234	8,2	7,5	2,4	58	10	16	17	860	0,21	27,6	25,2	16,4	8	22,8
233	14,9	7,3	2,2	56	14	15	23	500	0,14	26,2	30,1	15,1	8,5	20,1
232	2,2	7,4	2,4	54	9	16	27	1300	0,1	36,8	17,9	10,7	7,5	27,1
231	5,5	7,3	2,4	61	10	19	30	700	0,2	24	27,1	13,7	8,2	27,1
230	0,3	7,5	2,6	59	9	16	30	1320	0,14	39,5	13,2	10,9	8,1	28,3
229	14,1	7,5	2	56	10	14	21	250	0,23	22	45,1	9,4	5,4	18,1
228	9,8	7,3	2,3	53	13	15	24	770	0,11	22,5	34	14,3	7,1	22,1
227	11,3	7,5	2	51	10	12	17	250	0,09	3,8	47	23,7	7	18,6
226	14	7,6	1,7	44	8	12	16	310	0,08	3,8	47,3	24	6,4	18,5
225	14	7,5	1,6	41	7	11	13	250	0,07	6	51,4	20,1	4,4	18,2
224	7,5	7,4	2,1	34	9	12	19	1340	0,23	53,5	20,9	7,6	4,6	13,4
223	20	7,6	1,7	46	10	13	18	550	0,14	11,6	40,3	22,9	7,8	17,3
222	31	7,7	1,5	42	10	12	16	350	0,1	4,5	47,9	27,7	7,6	12,3
221	2,5	7,5	2,1	46	6	13	16	260	0,12	2,1	42,4	29,5	7,1	18,8
220	0,6	7,3	3,8	73	7	20	29	710	0,46	3,4	20,6	20,6	14,9	40,5
219	3	7,4	2,6	54	7	16	26	270	0,22	7,1	31,4	20,9	11,6	29