

Bindungsformen und Mobilisierbarkeit des Arsens in ausgewählten Bodenprofilen des Erdinger Moores

**83 Seiten,
35 Abb., 5 Tab.**

vorgelegt als
Diplomarbeit

an der
**Fakultät für Geo- und Umweltwissenschaften
der Ludwig Maximilians Universität München**

von
Henrietta Königskötter

**Betreuer:
Prof. Dr. O. Baume**

München, im September 2005

Kurzfassung

Das Untersuchungsgebiet Erdinger Moos liegt nördlich von München in Oberbayern. Die Böden des Erdinger Moores entwickelten sich aus kalkhaltigen quartären Ablagerungen und den tieferen Untergrund bilden tertiäre, sandige bis tonige, Molassesedimente in horizontaler Wechsellagerung.

Umfangreiche Untersuchungen des Geologischen Landesamtes, die dieser Arbeit vorausgingen, ergaben hohe As-Konzentrationen in den Böden des Erdinger Moores. Diese Arbeit gibt nun, anhand von drei Bodenprofilen im Grünlandbereich des Erdinger Moores, nördlich vom Flughafen München, Aufschluss über die Tiefenverteilung und Bindungsformen des Arsens. Schwerpunkt der Betrachtung bilden die Bindungen Arsen mit organischem Material und Arsen mit pedogenem Eisen bzw. Mangan-Oxiden. Die organischen Horizonte haben C_{org} -Gehalte von 15 - 34 %. Die Unterböden sind meist sehr kalkhaltig und weisen nur geringe organische Kohlenstoffgehalte auf. Der jeweilige Grundwasserschwankungsbereich wurde bei der Beprobung mit erfasst.

Die Profile weisen insgesamt hohe Eisengehalte von 4,65 - 9,13 % innerhalb der humosen Horizonte auf. Diese nehmen aber in den redoximorphen Horizonten stark ab und erreichen nur 0,38 - 2,6 %. Der höchste Fe- Gehalt von 30,9 % wurde im Ah-Go-Horizont des Profiles HH/1 gemessen. Parallel zeigt sich hier der höchste As-Gehalt mit 4063 mg/kg. Dieser Horizont stellt eine Ockerlinse dar.

Die Konzentrationen von Mn erreichen in den humosen Horizonten bis zu 1589 mg/kg, in den redoximorphen Horizonten hingegen nur um 200 mg/kg.

Die durchgeführten Korrelationsanalysen zeigen mit ihren Werten, pedogene Eisenoxide / Arsen ($R^2 = 0,93$) und Arsen / C_{org} ($R^2 = 0,45$) und Mn-Oxide ($R^2 = 0,40$) sehr deutlich, dass das Arsen vorwiegend an Fe-Oxide/Hydroxide in adsorbierter Form und nicht an Huminstoffe gebunden vorliegt.

Diese Ergebnisse schließen eine anthropogene Herkunft der hochkonzentrierten Arsenvorkommen aus und der Ursprung des Arsens ist in den tertiären, arsenhaltigen Sedimenten zu suchen. Eine Verlagerung könnte über tertiäres Grundwasser stattfinden, das durch ein angenommenes hydraulisches Fenster in die quartären Sedimente gelangt. Unter den aktuellen Bedingungen ist die Mobilisierbarkeit des Arsens sehr gering. Es besteht aber das Risiko, daß durch anthropogene Eingriffe, wie eine weiträumige Versiegelung der Böden oder eine Renaturalisierung der Moore, reduzierende Bedingungen geschaffen werden, die die Mobilisierbarkeit stark erhöhen.

Rövid tartalom

A vizsgálandó terület, Erdinger Moos, Münchentől (Németország) északra, Felsőbajorországban fekszik. Az Erdinger Moos lápos talaja negyedkori, kalcium-karbonátban gazdag lerakódásokból keletkezett, a mélyebb aljzatot pedig a harmadkori molasz vízszintes, homokos, agyagos üledéke képezi.

A Bayerisches Geologisches Landesamt (Bajor Földtani Intézet) által végzett felszíni és területi vizsgálatok, amelyek alapul szolgálnak ennek a diplomamunkának, magas arzénkoncentrációt mutattak ki. Feladata ennek a munkának, hogy az arzén mélységi eloszlásáról és a vegyületi formáiról három talajtani profil alapján felvilágosítást adjon. A súlypontját a vizsgálatoknak a vegyületi kapcsolódások az arzén és humusz, valamint az arzén és a vas- ill. mangán-oxidok között alkotják.

A talajok humusz tartalmú, szerves szintjei átlagosan 15 – 34% szerves szenet (C_{org}) tartalmaznak. Az alsó, redoximorf szintekre erős kalcium-karbonát tartalom és alacsony C_{org} - tartalom jellemző. A talajtani profilok a mindenkori alapvíz-ingadozószintjét is magába foglalják. A talajminták összességében magas vastartalmat (4,65 – 9,13 %) mutatnak a szerves anyagot tartalmazó szinteken belül. A vastartalom viszont erősen lecsökken a redoximorfen szintekben, és csak 0,38 – 2,6 % érnek el. A legmagasabb vastartalom, 30,9%, a HH/1-es profil Ah-Go-szintjében mérhető. Ezzel párhuzamosan ebben a szintben mérhető a legmagasabb arzénkoncentráció is, 4063 mg/kg. Ez a talajszint egy úgynevezett okkerlencsét szemléltet.

A mangánkoncentráció a humuszsintekben eléri akár a 1589 mg/kg-t is, ezzel szemben a redoximorf szintekben csak a 200 mg/kg körüli értéket.

Az elvégzett korrelációanalízis értékei, pedogéne Fe-oxidok / arzén ($R^2=0,93$) és arzén / C_{org} ($R^2=0,45$) valamint Mn-oxidok ($R^2=0,40$) egyértelműen kimutatták, hogy az arzén elsősorban Fe-oxiddal/hidroxiddal képez kötést és nem a humusszal.

Ezek a vizsgálati eredmények kizárják az arzén antropológiai eredetét, tehát az arzén származása a harmadkori arzént tartalmazó üledékekben keresendő. Az arzén áthelyeződése a harmadkori alapvízzel történhetett, ami egy hidraulikus ablakon keresztül a negyedkori üledékekbe juthatott. Az aktuális feltételek mellett az arzén mobilizálása csekély. Fennállhat viszont a kockázat, miszerint antropológiai beavatkozások, mint például egy területileg kiterjedő talajtani leszigetelés vagy a láp eredeti állapotának visszaállítása, redukáló feltételek kialakulásához, és ezáltal az arzén megnövekedett mobilizálódásához vezethet.

INHALTSVERZEICHNIS

Kurzfassung	I
Rövid tartalom	II
INHALTSVERZEICHNIS	III
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VI
Verzeichnis der Symbole	VII
Formelverzeichnis angeführter chemischer Substanzen	VIII
Verzeichnis der verwendeten Software	VIII
Danksagung	IX
 1 EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG	 1
 2 NATÜRLICHE BEDINGUNGEN.....	 2
2.1 Geographischer Überblick des Untersuchungsgebietes.....	2
2.2 Geologischer Überblick des Untersuchungsgebietes	4
2.3 Bodenentwicklung und Entstehung der Moore	8
 3 ARSEN, GRUNDLAGEN.....	 14
3.1 Eigenschaften, Vorkommen, globaler Kreislauf.....	14
3.2 Toxizität.....	17
3.3 Herstellung, Verwendung	18
3.4 Sorption von Arsen im Boden	18
 4 MATERIAL UND METHODEN.....	 22
4.1 Probenentnahme und Beschreibung der Bodenprofile.....	22
4.1.1 Profil HH/1	23
4.1.2 Profil HH/2	25
4.1.3 Profil HH/3	27
4.2 Laboranalysen	29
4.2.1 Bodenchemische Untersuchungen.....	29
4.2.1.1 Bestimmung der Bodenreaktion.....	29
4.2.1.2 Glühverlust und Glührückstand	29
4.2.1.3 Spezifische elektrische Leitfähigkeit.....	30
4.2.1.4 Bestimmung des Wassergehaltes der Böden	30
4.2.1.5 Kohlenstoffgehalt- Bestimmungen.....	31
4.2.1.5.1 Humusgehalte	31
4.2.1.5.2 SCHEIBLER- Methode.....	32

4.2.1.6.2 Gesamtgehalt an Kohlenstoff	33
4.2.2 Stoffgesamtgehalte in Böden	33
4.2.2.1 Bestimmung der Eluierbarkeit mit Wasser - S4.....	33
4.2.2.2 Extraktion mit Ammonium- Nitrat.....	34
4.2.2.3 Sequentielle Extraktionen.....	35
4.2.2.4 Phosphataustauschbares Arsen.....	37
 5 UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE UND DISKUSSION	38
5.1 Ergebnisse und Diskussion der Kohlenstoff- Analysen.....	38
5.2 Analysedaten von Actlabs.....	40
5.3 Ergebnisse und Diskussion der sequentiellen Extraktionen	42
5.3.1 Arsen.....	42
5.3.2 Eisen	45
5.3.3 Mangan	48
5.4 Korrelationen der Elemente	50
5.4.1 Arsen – Organischer Kohlenstoff	51
5.4.2 Arsen – Eisen.....	53
5.4.3 Arsen – Mangan.....	56
5.5 Phosphataustauschbares Arsen.....	58
5.6 Ökologische Bedeutung.....	61
5.7 Schlussfolgerungen und Ausblick	62
 ZUSAMMENFASSUNG	64
QUELLENVERZEICHNIS	66
ANHANG	70

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1.1: Übersichtskarte des Untersuchungsgebietes.	2
Abb. 2.1: Geologische Karte des Untersuchungsgebietes.....	6
Abb. 2.2: Bodenkundliche Karte des Untersuchungsgebietes.....	9
Abb. 2.3: Entwicklung der Niedermoore in Abhängigkeit des Reliefs.....	11
Abb. 3.1: Natürlicher Arsenkreislauf der Erde nach BOYLE & JONASSON (1973)	16
Abb. 3.2: Schematische Darstellung der Sorbtion von Kationen und Anionen	19
Abb. 3.3: As(III)-Oxidation.....	21
Abb. 4.1: Das Untersuchungsgebiet im Erdinger Moos	22
Abb. 4.2: Standort des Bodenprofils Dipl. HH/1 in nordöstlicher Richtung	24
Abb. 4.3: Profil Dipl. HH/1	24
Abb. 4.4: Standortkundliche Geländeaufnahme bei dem Profil Dipl. HH/2	26
Abb. 4.5: Profil Dipl. HH/2	26
Abb. 4.6: Standort des Profils Dipl. HH/3	28
Abb. 4.7: Profil Dipl. HH/3	28
Abb. 5.1: Organische Kohlenstoffgehalte in den einzelnen Horizonten	39
Abb. 5.2: Vergleich der Untersuchungsergebnisse von Arsen mit Actlabs- Werten....	40
Abb. 5.3: Ergebnisse der Fe-Untersuchungen in Vergleich mit den Actlabsdaten	41
Abb. 5.4: Vergleich der Mangan- Ergebnisse mit den Actlabs- Daten.....	41
Abb. 5.5: Tiefenverteilung des Arsens in den Profilen.....	43
Abb. 5.6: Relative As- Anteile der einzelnen Fraktionen.....	44
Abb. 5.7: Tiefenverteilung des Eisens in den Profilen	46
Abb. 5.8: Relative Eisengehalte der einzelnen Fraktionen	47
Abb. 5.9: Tiefenverteilung des Mangans in den einzelnen Profilen.....	49
Abb. 5.10: Relative Mangananteile der einzelnen Fraktionen.....	50
Abb. 5.11: Korrelationsdiagramm Arsen - Humusgehalt	51
Abb. 5.12: Korrelation zwischen As-Gesamtgehalte und organischem Kohlenstoff	52
Abb. 5.13: Absolute Gehalte der As-, und C _{org} - Konzentrationen.....	53
Abb. 5.14: Absolute As- und Fe-Konzentrationen in den Profilen.....	54
Abb. 5.15: Korrelation zwischen Arsen- Eisen	55
Abb. 5.16: Korrelationsanalyse zwischen Arsen und Eisen	55
Abb. 5.17: Korrelationsanalyse der pedogenen Fe- Anteile und Arsengehalte	56
Abb. 5.18: Arsen- und Manganverteilung in den Profilen	57
Abb. 5.19: Korrelation zwischen Arsen und Mangan.....	58
Abb. 5.20: Phosphatwerte des Austausch- Versuches	59
Abb. 5.21: Vergleich der Rücktauschwerte des Phosphats und Arsenats	60

TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 1.1: Terrassenfolge an der Isar seit dem Spätwürm	7
Tab. 3.1: Wichtige chemisch- physikalische Eigenschaften des Arsens.....	14
Tab. 4.1: Sequentielle Extraktionsverfahren	36
Tab. 5.1: Prüf- und Maßnahmenwerte für den Schadstoffübergang Boden – Mensch.	61
Tab. 5.2: Prüf- und Maßnahmenwerte für Arsen.....	61

VERZEICHNIS DER SYMBOLE

AAS	Atomabsorptionsspektrometrie
As(III)	dreiwertiges Arsen (arsenige Säure und ihre Salze)
As(V)	fünfwertiges Arsen (arsenige Säure und ihre Salze)
As _{ges} bzw. As _{sum}	Arsen-Gesamtgehalt bzw. Summe der einzelnen Fraktionen
C _{an}	anorganischer Kohlenstoff
C _{org}	organischer Kohlenstoff
C _{ges}	Gesamtkohlenstoff
Cr(III)	dreiwertiges Chrom
Cr(VI)	sechswertiges Chrom
DOC	Gelöster Organischer Kohlenstoff (dissolved organic carbon)
EDTA	Ethylendiamintetraacetat
FAO	„Food and Agricultural Organization of the United Nations“
Fe _d	mit Dithionit lösliches Eisen
HG-AAS	Hydridgenerierte Atomabsorptionsspektrometrie (Hydride Generation Atomic Absorption Spectrometry)
HG	Hydridtechnik (hydride generation technique)
KW	Königswasser (1:3 Schwefelsäure: Salzsäure)
PE	Polyethylen
pH	Maß für die saure bzw. basische Reaktion einer Lösung
ppm	„parts per million“, 10 ⁻⁶
TC	Gesamt Kohlenstoff (total carbonate)
TOC	Gesamter Organischer Kohlenstoff (total organic carbonate)
TS	Trockensubstanz
WRB	Weltbodendatenbank (World Reference Base for Soils)

FORMELVERZEICHNIS ANGEFÜHRTER CHEMISCHER SUBSTANZEN

Ammoniak	NH_3
Ammoniumfluorid	NH_4F
Ammoniumhydroxid	NH_4OH
Ammoniumnitrat	NH_4NO_3
Ammoniumoxalat	$\text{NH}_4\text{OOC-COONH}_4$
Ammoniumacetat	NH_4OAc
Natriumhydrogenarsenat	$\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \times 7 \text{ H}_2\text{O}$
Ascorbinsäure	$\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$
Hydroxylamin- Hydrochlorid	$\text{NH}_2\text{OH-HCl}$
Calciumchlorid	CaCl_2
Dinatrium- Hydrogenphosphat	Na_2HPO_4
Essigsäure	CH_3COOH (Kurzform: HAc)
Kaliumdichromat	$\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$
Natriumsulfit	Na_2SO_3
Natronlauge	NaOH
Oxalsäure	HOOC-COOH
Salpetersäure	HNO_3
Salzsäure	HCl
Schwefelsäure	H_2SO_4

VERZEICHNIS DER VERWENDETEN SOFTWARE

ACDSee32	Bildbearbeitung
ArcView 3.2	Gestaltung der Karten
CorelDraw 11	Bildbearbeitung und Grafikerstellung
Corel Photo-Paint 11	Bildbearbeitung
Excel	Tabellengestaltung, Diagramme
PowerPoint	Vortrag, Grafikerstellung
Word	Textverarbeitung
Macromedia Flash	Grafikerstellung

DANKSAGUNG

An erster Stelle möchte ich mich bei Herr Prof. Dr. Ottfried Baume bedanken. Seine Zusage, diese Arbeit zu betreuen, hat diese externe Arbeit für mich erst möglich gemacht. Weiter möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Hubert Schmid (Bayerisches Geologisches Landesamt, jetzt Bayerisches Landesamt für Umwelt) für die Betreuung bedanken.

Herrn Priv.-Doz. Dr. Thomas Rüde (RWTH-Aachen) möchte ich hier für die außerordentliche Betreuung danken. Durch seine Vermittlung ist diese Arbeit an mich herangetragen worden. Ohne sein wertvolles Wissen, seine Anregungen und seine Hilfe wäre diese Arbeit nicht möglich geworden.

An dieser Stelle möchte ich natürlich auch Herrn Dr. Walter Martin (Bayerisches Geologisches Landesamt, im Weiteren GLA) für die vielen Anregungen und die Unterstützung bei der Geländearbeit danken.

Frau Nicole Foullois (GLA) danke ich für die Betreuung im Labor und Hilfestellung bei der Bodenansprache und ebenso danke ich Herrn Titus Ebert (Landesanstalt für Landwirtschaft) für die Hilfe im Gelände.

Frau Elena Koci und Frau Karin Paschert danke ich für die Messung am AAS (Arsen), TOC (C) und die Eisen- und Manganmessungen.

Herrn Dipl. Chemieingenieur Thomas Pfau (GLA) möchte für die Messung am CNS-Gerät (C_{ges}) danken.

Dem ehem. Laborleiter des geographischen Instituts, Herrn Wagner, möchte ich für seine Hilfe und seinen Rat im Labor danken. Die anfänglichen Pannen im Labor möge er mir verzeihen.

Besonderen Dank an Herrn Thomas Hanauer, der meine Laborarbeit, trotz Zeitmangel, stets im Auge hatte und sich die Zeit nahm, geduldig meine Fragen zu beantworten.

Und nicht zuletzt möchte ich mich bei meinem Mann Peter, für seine Geduld, sein Verständnis und die Unterstützung bedanken.

1 EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG

Im Jahr 2002 wurden in Hallbergmoos erhöhte Arsenkonzentrationen in Böden festgestellt. Im selben Jahr wurden in der Gemeinde Hallbergmoos an weiteren Standorten erhöhte Arsenkonzentrationen bekannt. Daraufhin wurde eine umfangreiche Untersuchung im Auftrag des Geologischen Landesamtes im Jahr 2003 durchgeführt.

Diese Untersuchungen zeigten hohe Arsenkonzentrationen in Böden des Dachauer, Freisinger und Erdinger Mooses.

Gegenüber der vom GLA durchgeführten Erfassung der flächenhaften Arsenkonzentrationen, soll die vorliegende Diplomarbeit nun Aufschluss über die Tiefenverteilung und Mobilisierbarkeit des Arsens in diesen Böden geben. Ziel der Arbeit ist es herauszufinden, in welchem pedochemischen Milieu und in welchen Bindungsformen das Arsen auftritt. Dabei ist vor allem die Frage von Interesse, ob Arsen an Huminstoffe oder an (Eisen-) Hydroxide gebunden und entsprechend angereichert ist. Zu diesem Zweck wurden im Untersuchungsgebiet Bodenproben aus drei Profilen entnommen und im Labor qualitativ- bodenchemisch analysiert und mittels Korrelationsanalyse quantitativ ausgewertet.

Die Probenahme erfolgte in drei Tiefenprofilen an ausgewählten Standorten, die den Grundwasserschwankungsbereich erfaßten und wurden von jedem Horizont für die Untersuchungen entnommen.

Die Laboruntersuchungen bestehen aus drei Teilen. Im ersten Teil werden die Bodenprofile nach der bodenkundlichen Kartieranleitung beschrieben und hauptsächlich die bodenchemischen Untersuchungen, wie z. B. zur spez. el. Leitfähigkeit, zum pH-Wert und Glühverlust durchgeführt. Es wurden die eluierbaren und die austauschbaren Anteile des Arsens ermittelt.

Im zweiten Teil werden die Bindungsformen des Arsens anhand fraktionierter Untersuchung nach ZEIEN & BRÜMMER (1989) erfasst. Hier soll geklärt werden, ob Arsen mit den anorganischen Bestandteilen des Bodens auftritt.

Auf die Mobilisierbarkeit des Arsens soll ein Elutionstest und spezifischer Austausch mit Phosphor, im dritten Teil dieser Arbeit, Antwort geben.

2 NATÜRLICHE BEDINGUNGEN

2.1 Geographischer Überblick des Untersuchungsgebietes

Das Untersuchungsgebiet liegt nördlich von München und in südöstlicher Richtung von Freising, im Bereich des Erdinger Mooses. Das Erdinger Moos erstreckt sich zwischen dem nordöstlichen Stadtrand Münchens bei Riem und der Gegend südlich von Moosburg in einer Breite von 6 bis 10 km und einer Länge von 30 km. Das Gebiet liegt 417 bis 521 Meter über dem Meeresspiegel und gehört zur Münchner Schotterebene (LUPP 1984). Die Abbildung 1.1 zeigt die Lage des Gebietes in Südbayern.

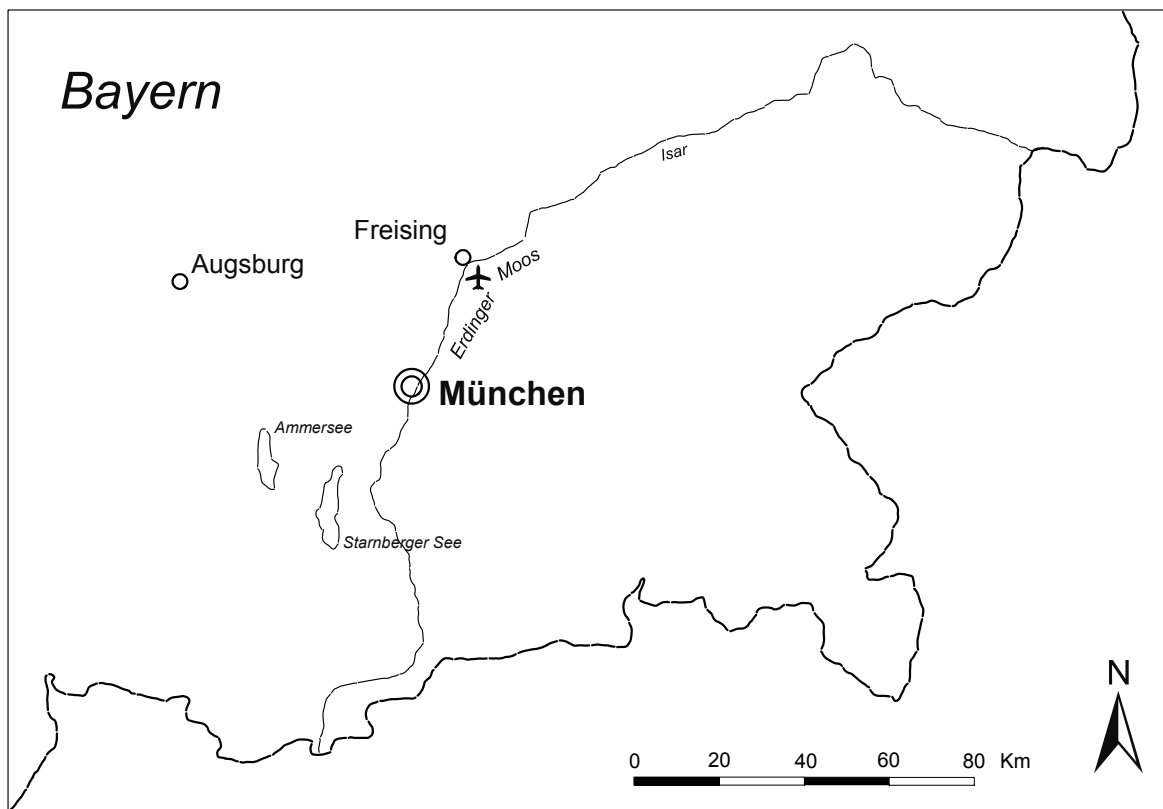


Abb. 1.1: Übersichtskarte des Untersuchungsgebietes. Kartengrundlage: Top50 Bayern Süd, 1:1 Mio.

Das subatlantisch bis subkontinental geprägte Klima beeinflusst maßgeblich den Ablauf der Bodenentwicklung und die Vegetation. Die Jahresmitteltemperatur in der langjährigen Messreihe im Raum Freising liegt bei 7,8 °C, der Jahresmittelniederschlag bei 804 mm (Normalwerte der Messperiode 1961 - 1990, für die Station 10870-Flughafen München, DWD). Die Vegetationsperiode dauert 210 - 230 Tage (SCHMIDT & WITTMANN: in FETZER et. al. 1986: 104). Die Temperatur erreicht ihr Maximum in

den Sommermonaten und der meiste Niederschlag fällt zwischen Mai und September. Die natürliche Vegetation wird durch geringflächige Wälder, vorwiegend Erle und Fichte an nährstoffärmeren Standorten bestimmt. Auf großen Teilen des Erdinger Mooses lagen Kalkflachmoore im Wechsel mit Schwarzerlenbruch und Niedermoor, mit Roterle, Grauerle, Moorbirke, Fichte, Kiefer und Traubenkirsche (ZEHENDER: in FETZER et. al. 1986: 94). Die Mooregebiete des Erdinger Mooses sind durch Sekundärbestände der Kalkflachmoore mit Sukzessionsstadien zum Erlenbruchwald und durch einen ständigen Wechsel von hochwertigem Grünland, Äckern, Gewürz- und Arzneipflanzen (Pfefferminz), Hecken und Baumzeilen gekennzeichnet (Regionaler Planungsverband München 2002). In der heutigen Zeit wurden viele der einst kultivierten Moorflächen aufgeforstet oder werden als Streuwiesen genutzt (JERZ 1993: 141).

Das Untersuchungsgebiet im Erdinger Moos liegt größtenteils in der Gemeinde Eitting, Landkreis Erding. Das Gebiet unterliegt vorwiegend der landwirtschaftlichen Nutzung. Bis an das Ende des 18. Jahrhunderts war hier noch natürliche Vegetation, das Moor dünn besiedelt und wurde zur Streugewinnung für Rinder und Pferde genutzt (Regionaler Planungsverband München 2002).

Die landwirtschaftliche Nutzung der Moosflächen begann erst im 19. Jahrhundert. Diese anfänglichen Versuche scheiterten. Um das Moor zu kultivieren, zündete man eine ausgetrocknete Torfschicht an und dann wurden diese Flächen bewirtschaftet, allerdings mit geringem Ertrag. Auf diese Weise wurden die organischen Oberböden im Laufe der Jahre vernichtet. Erst nachdem die Torfflächen die nächsten 30 Jahre brach gelegen hatten, konnten sie wieder gebrannt werden. So vertrat man die Ansicht, dass Moorboden organischer Natur und somit überhaupt kein Boden sei. Mitte des 19. Jh. fing man an, das Moor zu stechen und so den Torf als Brennmaterial zu verwenden (LUPP 1984). Damit setzte die landwirtschaftliche Kultivierung ein, die eine weitere Entwässerung, Bodensackungen und auch Bodenerosionen verursachte.

Die zunehmende Besiedlung der Mooregebiete Anfang des 20. Jahrhunderts führte zu noch weitgreifenderen Entwässerungsmaßnahmen. Von der Gesamtfläche des Erdinger Mooses waren in der Zeit nur noch 10 % nicht kultiviert (LUPP 1984). Der Bau des Mittleren Isarkanals sowie die Isarbegradigung Ende des 19. Jahrhunderts hatten auf die Moorflächen einen erheblichen Einfluss. Als Folge trockneten sämtliche Bäche und Quellen aus und die Grundwasseroberfläche sank erheblich (LUPP 1984).

Auf die natürliche Flora, Fauna und Bodenentwicklung des Erdinger Mooses hat im Weiteren der Bau des Flughafens, der nach einer mehrjährigen Planungsphase 1992 eröffnet wurde, großen Einfluss. Dadurch gab es sicherlich auch weitere an den

Flughafen gebundene Ansiedlungen, die die wenigen naturnahen Restflächen weiter reduzierten.

2.2 Geologischer Überblick des Untersuchungsgebietes

Das Erdinger Moos liegt im Bereich des Süddeutschen Molassebeckens. Den tieferen Untergrund bilden tertiäre Ablagerungen mit quartären Flussablagerungen über Sand, Feinkies und Ton (FREUDENBERGER & SCHWERD 1996). Diese Flussablagerungen sind jedoch im Bereich des Untersuchungsgebietes überdeckt, zum Teil von Moor und Alm (Abb. 2.1), sowie von jungen Abschlamm- Massen bzw. Auenlehm und Mergel, als Folge der Bodenerosion in den umliegenden Gebieten (BRUNNACKER 1959: 6).

Die jüngste Abfolge des Molassebeckens ist die tertiäre Obere Süßwassermolasse mit einer Wechselfolge aus Konglomeraten, Sanden und Mergeln (JERZ, GROTTENTHALER: in FETZER et. al. 1986: 42). Die Sedimentation dieser limnischen und fluviatilen Ablagerungen erfolgte im mittleren bis oberen Miozän, vor rund 17 - 10 Mio. Jahren (HOFMANN: in FETZER et. al. 1986: 17). Die fast ausschließlich klastischen Sedimente der Oberen Süßwassermolasse sind meist unverfestigt. Die schluffig-sandig, mergelige Ausbildung der glimmerreichen Ablagerungen der Oberen Süßwassermolasse wird auch als Flinz bezeichnet (FREUDENBERGER & SCHWERD 1996: 165). Wegen seiner Zusammensetzung ist diese Schicht sehr wasserundurchlässig (BRUNNACKER 1959: 27). Diese Wechselfolge der Oberen Süßwassermolasse bildet die Unterlage der im Untersuchungsgebiet verbreiteten quartären Ablagerungen (BRUNNACKER 1959: 8).

Aus den Alpen mehrfach vorstoßende Gletscher im Pleistozän haben Moränen hinterlassen (HENNINGSEN & KATZUNG 1998: 161). Im Vorfeld der Moränen wurden glazifluviale Schotter abgelagert, die sich durch ausgedehnten Schotterfelder auszeichnen. Diese Schotterfelder der großen Vorlandgletscher vereinigten sich in Schmelzwassertälern zu riesigen Schotterebenen, so entstand auch die Münchner Schotterebene (FREUDENBERGER & SCHWERD 1996: 241). Die Schotterfelder werden im Allgemeinen aus alpinen Geröllen mit feinsandigem Zwischenmittel aufgebaut (FETZER: in FETZER et. al. 1986: 35).

Die Schotter des Jungpleistozäns (Würmglazial) sind stark karbonathaltige, stein und-blockhaltige, sandige Kiese mit geringen Schluffgehalten. Entsprechend der wechselnden Wasserführung der Gletscherflüsse schwankt die Kornverteilung. Die Karbonatgehalte der Sedimente in der Münchner Schotterebene nehmen von Süden nach Norden ab. Südlich von München beträgt der Karbonatgehalt der Korngrößenfraktion < 2 mm etwa 60 - 80 %, wobei sie nördlich von München auf 50 -

70 % abfallen. Dies ist auf die zunehmende Vermischung der karbonatreicheren Schotter des Isar-Loisachgletschers mit dem etwas silikatreicheren Schotter des Inngletschers zurückzuführen. Die Farbe des Materials ist hellgrau bzw. hellgelblichgrau (GROTTENTHALER: in FETZER et. al. 1986: 34).

Die Postglazialen (Holozän) Schotter im Untersuchungsgebiet sind durch karbonatreiche Fluss- und Bachablagerungen charakterisiert. Der Unterschied zum älteren Schotterkörper besteht darin, dass die Schichtung des Schotterkörpers besser ausgeprägt ist, die Karbonatgehalte sind höher und treten großflächig in schluffig-feinsandigen Deckschichten (Flussmergel, Auensedimente) auf (GROTTENTHALER: in FETZER et. al. 1986: 33).

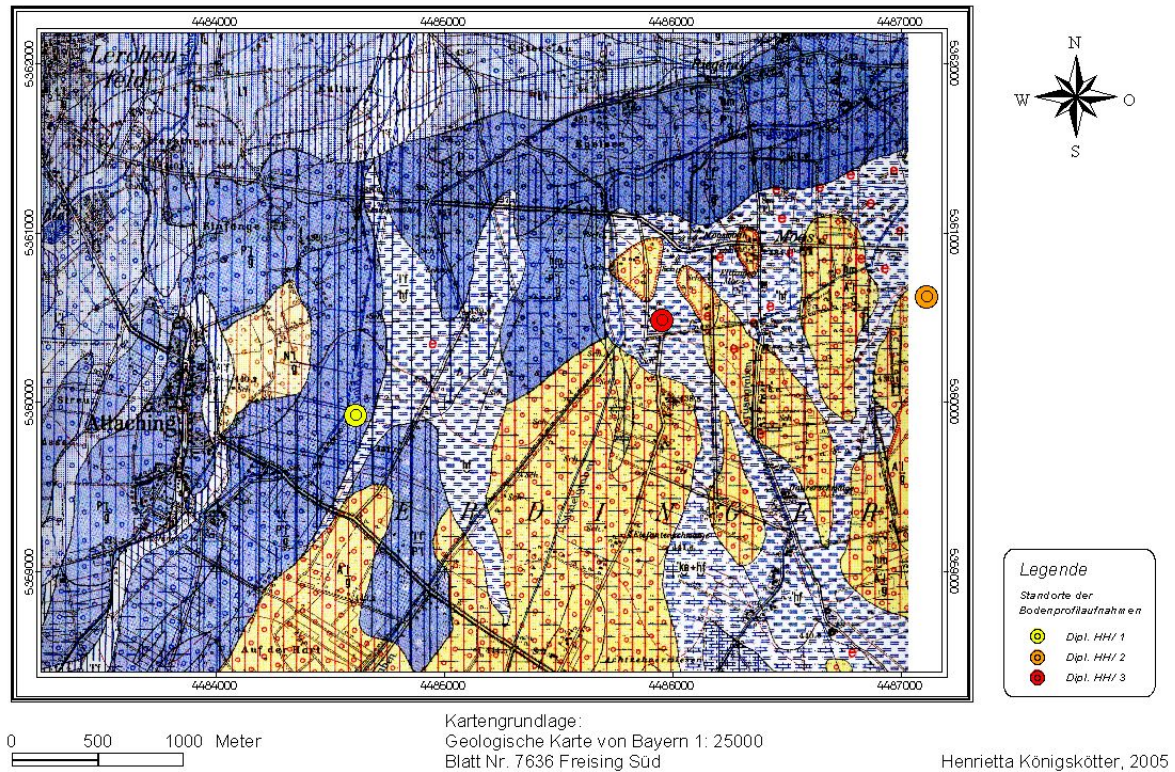
Flussmergel sind feinsandige - schluffige Ablagerungen und bedecken häufig und in wechselnder Mächtigkeit die postglazialen Schotterterrassen. Der aus vorwiegend abgeriebenen und aufgearbeiteten Flussgeröllen entstandene Flussmergel nimmt an Mächtigkeit vom Oberlauf zum Mittel- und Unterlauf zu. Da die Isar eine relativ geringe Schwebstofffracht aufweist, treten die Flussmergel auf den Schotterterrassen erst zum Unterlauf hin flächenhaft mit Mächtigkeiten von mehreren Dezimetern bis zu einem Meter in Erscheinung (JERZ: in FETZER et. al. 1986: 30).

Die jungen Auensedimente des Holozäns (Subatlantikum) setzen sich aus Geröllen und Gesteinszerreißel, aus Kies, Sand und Schluff zusammen. Das Material stammt vorwiegend aus den Alpen und wird durch hohen Karbonatgehalt charakterisiert. Die Flussablagerungen enthalten oft umgelagertes Moränen- und Molassenmaterial, häufig auch Bodenmaterial. Letzteres ist auf die Rodungstätigkeit seit der frühgeschichtlichen Zeit (Neolithikum, vor allem ab der Bronzezeit) und einen erosionsfördernden Landbau zurückzuführen. Örtlich sind auch organische Materialien (Schneckenhäuser, Holzreste) und auch Kulturreste (Keramikscherben, abgerollte Ziegelreste, bearbeitete Hölzer) zu finden (JERZ: in FETZER et. al. 1986: 30; 1993: 127).

Die holozänen Flussablagerungen wurden durch ^{14}C - Bestimmungen an organischem Material genauer datiert. BRUNNACKER (1959) kennzeichnet diese holozäne Terrassen als Stufen. Auf dem Kartenblatt Freising Süd (geol. Aufnahme: BRUNNACKER 1959) wurden die folgenden sechs Terrassenstufen beschrieben.

In München wurden im ausgehenden Spätglazial die Schotter der Rißeiszeitlichen Hochterrasse und die der Würmeiszeitlichen Niederterrasse aufgeschüttet (MÜNICHSDORFER: in JERZ 1993: 127). Diese Ablagerungen finden sich auch im Untersuchungsgebiet und werden als Altstadt-Stufe bezeichnet.

Geologische Karte des Untersuchungsgebietes



Farben und Zeichenerklärung

Quartär

Holozän

Jüngeres Holozän

- Auenmergel und-lehm
In größerer Mächtigkeit
- Abschlamm - Massen
(Lehm)

Jüngeres Holozän (Fluviatile Bildungen)

Auwald- Stufe:

- a) Sandiger Lehm über Kies
- b) Kies

Lerchenfeld- Stufe:

- Lehm
- a) Lehm über Kies
- b) Kies

Älteres Holozän (Limnische Bildungen)

- a) Ocker
- b) Alm
- Alm
In größerer Mächtigkeit
- Alm im Wechsel
mit Flachmoortorf
- Flachmoortorf

Älteres Holozän (Fluviatile Bildungen)

Pulling- Stufe:

- Lehm
- a) Lehm über Kies
- b) Kies

Neufahr- Stufe:

- Lehm über Kies
- Kies

Pleistozän (Fluviatile Bildungen)

Altstadt- Stufe:

- Lehm über Kies
- Kies

Terrassenrand

Auszug aus der Legende
Geologische Karte von Bayern 1: 25000
Blatt Nr. 7636 Freising Süd, 1958

Abb. 2.1: Geologische Karte des Untersuchungsgebietes mit Standortbezeichnungen. Ausschnitt aus der GK von Bayern 1:25000, Bayerisches Geologisches Landesamt, 1958

Die älteste der holozänen Isarterrassen, die Neufahrn- Stufe kommt, wie in in der geologischen Karte (Abb. 2.1) dargestellt, nur nordöstlich von Attaching vor (BRUNNACKER 1959: 23). Die Datierung der Stufe erfolgte an Kiefer-Baumstämmen, mit dem Ergebnis, dass die Terrasse um die Wende Präboreal/ Boreal entstanden ist (JERZ 1993:128).

Die nächst jüngerer Terrasse, die Pulling- Stufe wurde in einem größeren Zeitraum im frühen Subboreal aufgeschüttet (JERZ 1993: 128). Die Datierung eines Baumstammes, mit der ^{14}C - Analyse, ergab ein Alter von 4300 Jahre v. h. (BRUNNACKER 1959: 18).

Die Lerchenfeld- Stufe zeichnet sich durch eine mächtige Flussmergeldecke aus (JERZ 1993: 128). Das Alter dieser Terrasse wurde durch entsprechende Funde 2000 Jahre v. h. datiert (BRUNNACKER 1959: 18).

Die Aufschotterung der nächsten Terrasse, die als Dichtl- Stufe bezeichnet wird, reicht vom Mittelalter bis in die Neuzeit. Die Schotter dieser Terrasse enthalten abgerollte Ziegelbrocken und Holzreste (JERZ 1993: 128). Im Arbeitsgebiet kommt diese Stufe jedoch nicht vor.

Die jüngste Isarterrasse gehört der Auwald- Stufe an. Sie ist durch einen dichten, flußbegleitenden Auwald gekennzeichnet (JERZ 1993:128). Bis zu den Isarbegradigungen am Anfang des 20. Jahrhunderts verlegte der Fluss seinen Lauf mehrmals und hinterließ zahlreiche Altwasserrinnen (BRUNNACKER 1959: 26). Die Auwald- Stufe erreicht nicht das Arbeitsgebiet. In der Tabelle 2.1 ist die Terrassenfolge der Isar seit dem Würm/Spätglazial zusammenfassend dargestellt.

Tab.1.1 : Terrassenfolge an der Isar seit dem Spätwürm. (verändert nach JERZ 1993)

Zeitabschnitte <i>Konv. ^{14}C- Alter v. h.</i>	Terrassenabfolge im Isar- Gebiet	Kulturstufen
Subatlantikum ----- 2000 ----	Auwald- Stufe Dichtl- Stufe Lerchenfeld- Stufe	Neuzeit Mittelalter Eisenzeit - Römerzeit
Subboreal ----- 5000 ----	Pulling- Stufe i. w. S.	Bronzezeit
Atlantikum ----- 8000 ----		Jungsteinzeit
Boreal Präboreal ----- 10000 ----	Neufahrn- Stufe	Mittelsteinzeit
Würm- Spätglazial ----- 14000 ----	Altstadt- Stufe	Jüngere Altsteinzeit

2.3 Bodenentwicklung und Entstehung der Moore

Die Böden bzw. die Moore nördlich von München entwickelten sich seit der letzten Eiszeit. Das Ausgangsmaterial der Böden ist von spät-, postglazialer Herkunft (vgl. Kap. 2.2).

Die Entwicklung der Böden wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst. Ein wichtiger Faktor der Bodenbildung ist das Ausgangsgestein. Die Minerale werden zum Teil direkt aus dem Gestein geliefert oder sind aus deren Lösungsprodukten entstanden. Der Mineralbestand ist vor allem bei jungen Böden dem Ausgangsmaterial sehr ähnlich (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1998: 375).

Auf dem Ausgangsmaterial am Nordrand der Münchner Schotterebene entwickelten sich Moore, Anmoore und weitere Grundwasserböden. Die Entwicklung dieser Böden ist an die speziellen hydrologischen Verhältnisse dieses Gebietes gebunden (BRUNNACKER 1959: 26).

Die Würm- eiszeitlichen Ablagerungen im Alpenvorland zeichnen sich durch vielfach ausgedehnte Schotterfelder aus.

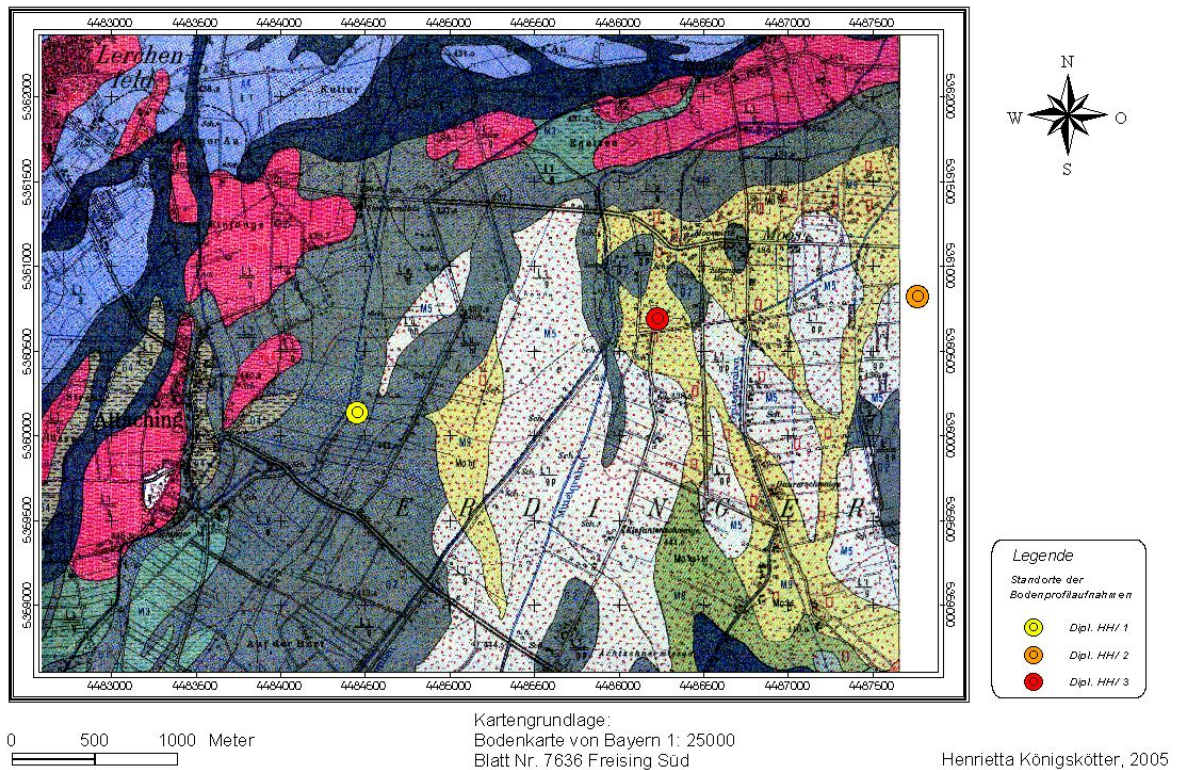
Im Spätglazial führte der schwindende Permafrost zur Neubildung von Grundwasser im Schotterkörper, das sich dem Gefälle nach bewegt (LIEDTKE & MARCINEK 2002: 614). Die Schotterebene ist, wie das Molassebecken, flach nach Norden geneigt. Infolge dieses Gefälles kommt es am Nordrand der Schotterebene zum flächenhaften Austritt des Grundwassers und zur Bildung von großen Sumpf- und Mooregebieten (HENNINGSEN & KATZUNG 1998: 162).

Im Untersuchungsgebiet, wie man der Abbildung 2.2 entnehmen kann, kommen vorwiegend Gleye und Moorböden vor. Am westlichen Kartenrand kommt es zur Bildung von Mullrendzinen und am nördlichen Kartenrand sind Auenböden aus Flussmergel entwickelt. Im Folgenden werden die, für diese Arbeit relevanteren Gleye bzw. Moorböden beschrieben.

- **Gleye und Übergangsformen**

Der Name Gley kommt von dem deutschen Wort Klei, was entwässerter Schlick bedeutet. Die semiterrestrischen Grundwasserböden entwickeln sich unter dem Einfluss von relativ hohen, wenig schwankenden Grundwasserständen (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1998: 436).

Bodenkarte des Untersuchungsgebietes mit Standortbezeichnungen



Farben und Zeichenerklärung

Kartierungseinheit (Bodentyp)

Rendzinen

Flachgründig, kalkhaltig bis kalkreich,
Struktur und Humusform günstig

- Dunkelgraue Mullrendzina aus Flussmergel aus holozänen Isarablagerungen
- Graubraune Mullrendzina aus Flussmergel aus holozänen Isarablagerungen

Auenboden

Zeitweilig überschwemmt,
sonst tiefer Grundwasserstand

- Mullkalkauenboden aus Flussmergel holozänen Isarablagerungen

Gleye

Oberflächennaher, wenig
schwankender Grundwasserstand

- Kalkgley aus holozänen Flussmergel der Isar und aus Alm
- Kalkiger Gley aus spätglazialen Flussmergel der Isar und Ablagerungen
- Schwarzer kalkiger Gley aus holozänen Flussmergel brockige Struktur

Moorböden

Abbau der organischen Substanz infolge
oberflächennahen Grundwasserstandes gehemmt

- Kalkiges Anmoor aus Alm
- Kalkiges Pechanmoor wie G4, jedoch humusreicher
- Puffiges kalkiges Anmoor wie M1, lockere Einzelkomstruktur
- Puffiges basenreiches Anmoor wie M4
- Puffiges kalkiges Niedermoor wie M4
- Puffiges basenreiches Niedermoor wie M4
- nicht kartierte Fläche

Bodenart

- S** Sand
- SI** anlehmiger sand
- IS** lehmiger Sand
- SL** stark lehmiger sand
- sL** sandiger Lehm
- L** Lehm
- IT** lehmiger Ton
- T** Ton
- Mo** Moor
- IMo** lehmiges Moor

Bodenerosion

- a) Stark erodiert
- b) Schwach erodiert
- c) Stark gefährdet bei Nutzungswechsel
- d) Graberosion
- e) Durch Verwehung gefährdet

Auszug aus der Legende
Bodenkarte von Bayern 1: 25000
Blatt Nr. 7636 Freising Süd

Abb. 2.2: Bodenkundliche Karte des Untersuchungsgebietes. Ausschnitt aus der Bodenkarte von Bayern 1:25000, Bayerisches Geologisches Landesamt (1958/ 59)

Die dabei entwickelten Gleye (FAO und WRB: Gleysols) weisen ausgeprägte redoximorphe Merkmale auf (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1998: 436).

Im Profil haben typische Gleye eine durch das Grundwasser geprägte Horizontabfolge: Ah/ Go/ Gr. Dem oberen, von Grundwasser nicht beeinflussten Ah-Horizont folgt der rostbraune Oxidationshorizont Go und darunter der stets unter Wasser stehende, graue Reduktionshorizont Gr (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1998: 436).

Im ständig wassergesättigten Gr-Horizont herrschen reduzierende Verhältnisse, weil in abflusslosen Senken oder auf lehmig-tonigem Material das Grundwasser nur langsam abfließt. Der vorherrschende Sauerstoffmangel führt zur Lösung der Fe- und Mn-Verbindungen, die kapillar mit dem Grundwasser aufsteigen. Im Go-Horizont kommen sie in Kontakt mit Luftsauerstoff und fallen als Oxide aus. Im Grundwasser gesättigten Horizont verbleibt ein Teil des Eisens und Mangans in Form von graublau gefärbten Fe(II)-, Mn(II)-Verbindungen und schwarzer Fe(II)-Sulfide (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1998: 437).

Die Entwicklung der Gleye unterscheidet sich im Ausgangsmaterial, Ausmaß der Grundwasserschwankungen, dem Sauerstoffgehalt und der Fliessgeschwindigkeit des Grundwassers, sowie dem Gehalt an organischen Verbindungen und Salzen (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1998: 437). Nach dem Karbonatgehalt des Ausgangsmaterials werden die Gleye in Kalkgleye (>10 % Karbonat), Kalkhaltige Gleye (i. d. R. <10 % Karbonat), Kalkgründige Gleye und Karbonatfreie Gleye gegliedert (HOFMANN: in FETZER et. al. 1986: 67)

Im Untersuchungsgebiet kommen Kalkgleye und Kalkhaltige Gleye vor. Die Kalkgleye und die Kalkhaltigen Gleye sind oft miteinander vergesellschaftet. Das Ausgangsmaterial wird von Flussmergeln, Kalkschottern und von holozänen See- und Bachablagerungen geliefert. Bodentypologisch werden die Kalkgleye, je nach Grundwasserstand bei ihrer Entstehung, in Gley- Rendzina bzw. -Pararendzina und Anmoorgley gegliedert (HOFMANN: in FETZER et. al. 1986: 68). Da im Untersuchungsgebiet das Grundwasser reich an Karbonaten ist, kann in diesen Kalkgleyen anstelle des Go- Horizontes ein entsprechend karbonatreicher Gc- Horizont entstehen (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1998: 437).

In Randbereichen der Niedermoore sich befindende Anmoorgleye waren ursprünglich als Niedermoore gebildet, die durch Kultivierung ihren eigentlichen Charakter verloren haben. Die organische Substanz beträgt 15 – 30 % (HOFMANN: in FETZER et. al. 1986: 68).

Die Kalkgleye und Kalkhaltigen Gleye sind nach oberflächiger Austrocknung (Entwässerung) durch Verwehungen stark erosionsgefährdet. Nach der Entwässerung wird der Boden stärker durchlüftet und dadurch der Humusabbau beschleunigt. Der Prozess führt zum Verlust an organischer Substanz und Stickstoff. Die Kalkgleye und

ihre Übergangsformen werden landwirtschaftlich als Grünland, Streuwiesen und bei entsprechender Entwässerung als Acker genutzt (SCHMIDT & GROTTENTHALER: in FETZER et. al. 1986: 290).

- **Moore und Moorböden**

Moore, die Böden aus Torf, werden im FAO- und WRB- System als Histosole bezeichnet. Moore sind hydromorphe Böden und zeichnen sich durch die über 3 dm mächtigen Torfhorizonte (> 30 % organische Substanz) aus (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1998: 444). Moore entstehen dort, wo hohes Grundwasser und/oder humides Klima und geeignete Landschaftsformen wie Mudden, flach geneigte Ebenen oder Talauen gegeben sind (HUTTER et. al. 1997: 9). Es wird nach Aufbau, Gestaltung und Grundwasserferne in subhydriche Niedermoore (topogene Moore) und Grundwasser unabhängige Hochmoore (ombrogene Moore, Regenwassermoore) unterschieden (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1998: 444).

Im Untersuchungsgebiet kommen ausschließlich Niedermoore vor. In Abhängigkeit des Reliefs können sich Verlandungsmoore, Versumpfungsmoore und Quell- oder Hangmoore entwickeln (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1998: 444). Die Entwicklung der Niedermoore zeigt die Abbildung 2.3.

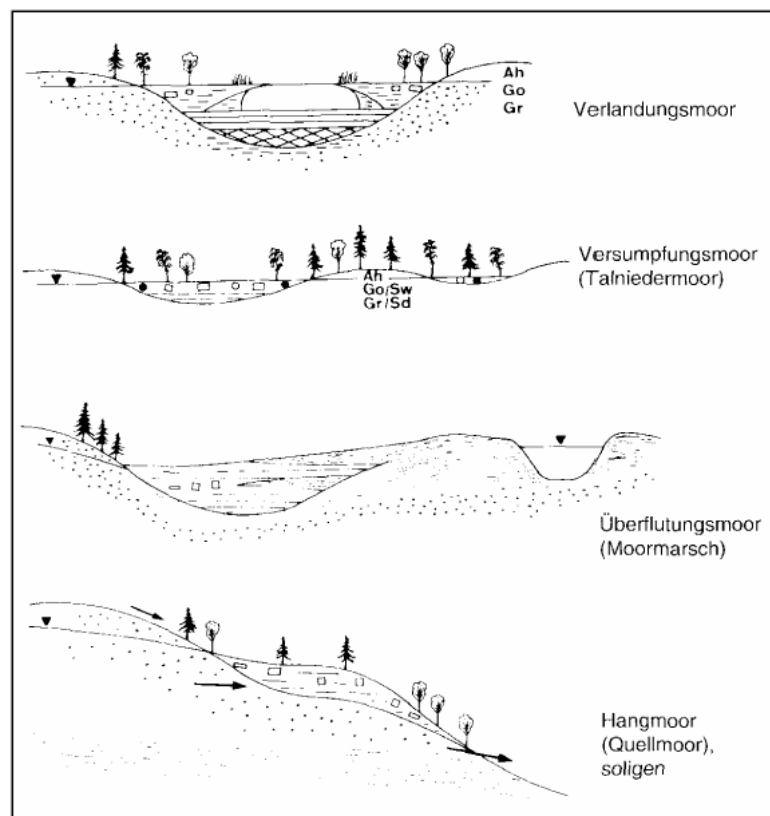


Abb. 2.3: Entwicklung der Niedermoore in Abhängigkeit des Reliefs nach KUNTZE (1994)

Die Versumpfungs- bzw. Verlandungsmoore entwickeln sich häufig im Uferbereich der Seen auf subhydrischen Böden (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1998: 444). Überflutungsmoore entstehen dort, wo in der Torfbildung neben dem hoch anstehenden Grundwasser auch lang andauernden Überflutungen mit Fremdwasser beteiligt sind (HUTTER et. al. 1997: 16). Wenn Schichtwasser am Hang oder im Tal austritt, entstehen Hang- bzw. Quellmoore (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1998: 444).

Die Niedermoores am Nordrand der Münchner Schotterebene zählen nach der Entstehung zu den Quellmooren. Das quartäre Grundwasser fließt auf den geringleitenden Mergeln und Tonen der Molasse in Richtung Norden und tritt dort flächenhaft aus (HOFMANN & SCHMIDT: in FETZER et. al. 1986: 70). Im Gegensatz zu den Hochmooren sind die Torfe der Niedermoores meist stark humifiziert und durch ihre schwarze Farbe gekennzeichnet (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1998: 444).

In den Niedermoores des Erdinger Mooses kommt es verbreitet zur Ausfällung von grauweißer, lockerer, feinkörniger Alm, da das Grundwasser extrem kalkreich ist. Der Name Alm wird von terra alba (MÜNICHSDORFER 1928) abgeleitet und ist die bayerische Bezeichnung für Wiesenkalk (BRUNNACKER 1959: 43). Diese Alm-Ausfällungen sind oft mit großen Linsen (teilweise mehrere Quadratmeter) aus Eisenocker vergesellschaftet (JERZ 1993: 135). BRUNNACKER (1959) beschreibt, dass diese, im Grundwasser gelösten Eisenkarbonate durch bestimmte chemisch-physikalische Voraussetzungen als Eisenhydroxide in Form von Ocker ausfallen.

Ähnlich wie bei den Grundwasserböden kommen im Untersuchungsgebiet (vgl. Abb. 2.2.) Kalkige Niedermoores und Kalkige Anmoore, bedingt durch das karbonatreichere Grundwasser, vor.

In den Torfen der Kalkigen Niedermoores sind auch häufig Karbonatausfällungen in Form von Alm zu beobachten. Die Böden der Moores entwickelten sich aus einer >3 dm mächtigen, entwässerten Torfschicht. In Randbereichen der Moores sind oft Böden mit Torfschichten <3 dm entwickelt. Diese werden den Moorgleyen zugeordnet. Die Niedermoores und ihre Übergangsformen sind meist basenreich und die pH-Werte liegen im neutralen oder schwach sauren Bereich (HOFMANN & SCHMIDT: in FETZER et. al. 1986: 71).

Die nährstoffreichen Niedermoores eignen sich besser zur Grünland- als zur Ackernutzung. Die Oberfläche des Bodens trocknet bei Ackernutzung schnell aus und wird dadurch puffig (locker) (BRUNNACKER 1959: 59).

Die Moorböden im Erdinger Moos sind bereits stark erosionsgefährdet. Die Böden verlieren bei Austrocknung die Quellfähigkeit und dadurch zerfallen die Krümel in

kleinere Bruchstücke. Dann können sie leichter vom Wind verweht werden. Durch Entwässerung und Kultivierung werden die Zersetzung der Torfe, der Humusabbau und die Mineralisierung weiter beschleunigt (HOFMANN & SCHMIDT: in FETZER et. al. 1986: 71).

3 ARSEN, GRUNDLAGEN

3.1 Eigenschaften, Vorkommen, globaler Kreislauf

Der Name Arsen kommt aus dem griechischen und bedeutet „männlich“. Das Element ist seit dem Mittelalter bekannt, sein Entdecker war Albertus Magnus um 1250 (SCHRÖTER et. al. 1990: 383).

Das halbmimetallische Element Arsen der Stickstoffgruppe ist sehr reaktionsfreudig und kommt in vielen organischen und anorganischen Verbindungen vor (UMWELTBUNDESAMT 1998). Die physikalischen und chemischen Eigenschaften sind ähnlich dem Phosphor (JORDAN 1994: 2). Einige Eigenschaften des Arsens sind in der Tabelle 3.1 zusammengefasst.

Tab. 3.1: Wichtige chemisch- physikalische Eigenschaften des Arsens nach KOHLER & FISCHER (2000)

Ordnungszahl	33
Mittelwert der Atommasse	74,9216 g/mol
Atomradius	125 pm
Oxidationszahlen	V, III, -III
Elektronegativität nach Pauling	2,18 (III)
Siedetemperatur	817
Schmelzpunkt	sublimiert
Dichte	5,72 g/cm ³

Es gibt bei Arsen, so wie bei Phosphor, drei stoffliche Modifikationen, zwei nichtmetallische und eine metallische.

In der Natur kommt Arsen selten in Form von Scherbenkobalt vor, meist ist es sulfidisch gebunden (SCHRÖTER et al. 1990: 383). Die am häufigsten vorkommenden Arsenmineralien sind Sulfide und Sulfidsalze. Bekannte arsenhaltige Mineralien sind Arsenkies oder Arsenopyrit (FeAsS), Auripigment (As_2S_3), Realgar (As_4S_4), Rotnickelkies (NiAs) und Enargit (Cu_3AsS_4). Die Gewinnung von Arsen erfolgt zum Großteil als Nebenprodukt der Verhüttung von Kupfer-, Blei-, Gold- und Silbererzen (O'NEILL: in ALLOWAY 1999: 114).

Als bekanntes Arsenik („Schwiegermuttergift“) tritt Arsentrioxid– As_2O_3 in der Natur als Verwitterungsprodukt der meisten Arsensulfide auf (JORDAN 1994: 2).

In wässriger Umgebung sind die wichtigsten anorganischen Arsenverbindungen die Arsenige Säure (H_3AsO_3) und die Arsensäure (H_3AsO_4) und deren Salze, die Arsenite und Arsenate (TRETNER 2002: 8).

Durch die mikrobielle Aktivität in anaerobem Milieu kommt Arsen in Form von organischen Verbindungen wie Dimethylarsonsäure und Monomethylarsonsäure vor (TRETNER 2002: 8; JORDAN 1994: 3).

Die Durchschnitts- Arsengehalte der Erdkruste betragen 1,8 mg/ kg (NORMAN 1998: 404) und neben den magmatischen Gesteinen weisen deutlich höhere Arsengehalte die fossilen Brennstoffe (Kohle: bis zu 2000 mg/kg, Mittel: 13 mg/kg) und Eisenerze (Mittel 400 mg/kg) auf (RÜDE 1996: 4).

Die natürlichen Arsengehalte in Böden hängen vom Ausgangsgestein ab (RÜDE 1996: 4). Die Spannweite beträgt 1 - 40 mg/kg (MANZ 1995: 9), wobei die meisten Böden unterhalb von 10 mg/kg liegen. Der Hintergrundwert (geogener Grundgehalt des Bodens) in den Moorböden des Alpenvorlandes für Arsen beträgt 9,7 mg/kg TS bei Acker- und Grünlandnutzung in den Torfhorizonten (GLA 1998). Die kritische Gesamtkonzentration des Arsens in Böden (Der Bereich, oberhalb dessen toxische Effekte als möglich angesehen werden) liegt bei 20 - 50 mg/kg (O'NEILL: in ALLOWAY 1999: 114).

Anthropogene Arsenanreicherungen in Böden wurden z.B. durch den Einsatz von Pestiziden verursacht. In der Landwirtschaft hat man Arsenverbindungen (Herbizide) eingesetzt. Auch wegen der phytotoxischen Wirkung wurde es als Defoliant in der Baumwollernte verwandt. Zur Bekämpfung von Schadinsekten kam Bleiarсенat zum Einsatz. Da es nach Einsetzen größerer Mengen an anorganischen Arsenverbindungen zur Akkumulation von Arsenrückständen in Böden und Gewässersedimenten kam, wurden diese durch andere Stoffe ersetzt (NORMAN 1998; O'NEILL: in ALLOWAY 1999: 115).

Die Arsengehalte in Pflanzen sind gering, in der Regel unter 1 mg/kg bezogen auf die Trockensubstanz und in phytotoxischer Hinsicht zeigt Arsen seine Wirkung durch Hemmung der Photosynthese (MANZ 1995: 9), plötzliche Abnahme der Wassertransportfähigkeit (Verwelken der Blätter und Defoliation) und Zerstörung der Chloroplasten. Die Aufnahme des Arsens durch Wurzeln aus dem Boden hängt vielmehr von verfügbarem Arsen als von der Arsengesamtkonzentration des Bodens ab. Die toxische Wirkung des Arsens auf die Pflanzen nimmt mit steigendem Säuregehalt des Bodens (pH 5), insbesondere wenn Eisen und Aluminiumoxide leicht löslich werden, zu (O'NEILL: in ALLOWAY 1999: 124).

Im natürlichen Kreislauf des Arsens (BOYLE & JONASSON 1973) findet ein Austausch zwischen Arsen und seinen Verbindungen mit der Litho-, Hydro-, Atmo-, Pedo-, und Biosphäre statt (BAYER 1997: 206). Die Abbildung 3.1 stellt den globalen Arsenkreislauf dar. Die natürlichen Arsenverbindungen der Lithosphäre gelangen als Verwitterungs- bzw. Lösungsprodukte der Gesteine in die Hydrosphäre.

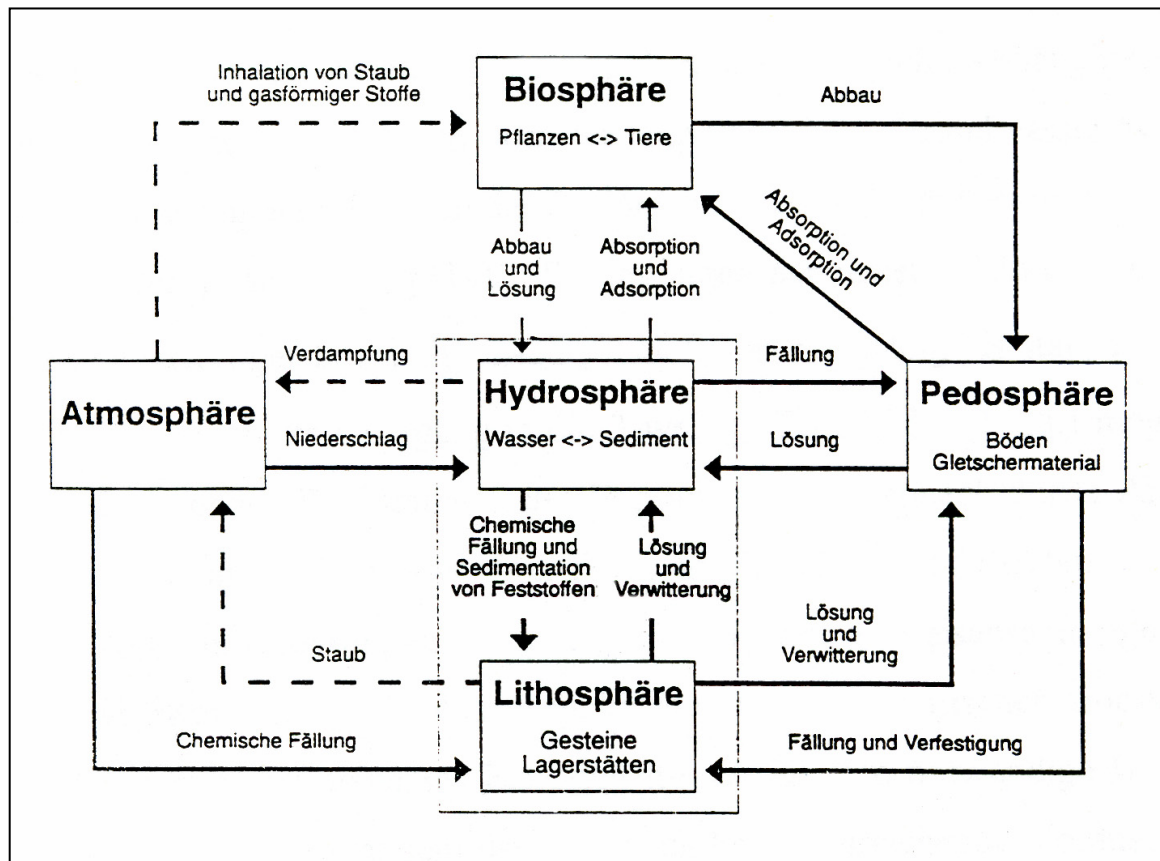


Abb. 3.1: Natürlicher Arsenkreislauf der Erde nach BOYLE & JONASSON (1973) in BAYER (1997)

Über Staub (Vulkanische Tätigkeit) bzw. anthropogen verursachten Eintrag (Erzverhüttung, Kohleverbrennung) gelangt Arsen von der Atmosphäre durch Niederschlag wieder in die Hydrosphäre. Als Arsensenken können damit neben der Lithosphäre, die Ozeane gesehen werden (TRETNER 2002: 10).

In der Pedosphäre vorkommende Arsenkonzentrationen stammen vorwiegend aus anthropogener Herkunft, größtenteils aus Abfallstoffen kommerzieller Produkte (TRETNER 2002: 10) und aus Lösungs- bzw. Verwitterungsprodukten des Ausgangsmaterials. Im Lösungsprodukt kann das Arsen wieder in die Hydrosphäre eingetragen werden. Arsen (geogen und anthropogen bedingt), welches in das Grundwasser gelangt, wird von Pflanzen, Tieren und Menschen (Biosphäre) aufgenommen (BAYER 1997: 207).

3.2 Toxizität

Arsen ist ein relativ mobiles und für die Tiere in sehr niedrigen Konzentration ein essentielles Element (ALLOWAY 1999: 33).

Es wirkt bei 5 - 50 mg/Tag Dosis toxisch und tödlich bei 50 - 340 mg/Tag (TRETNER 2002: 10).

Die giftigste Arsenverbindung ist der gasförmige Arsenwasserstoff (Arsin AsH_3) (UMWELTBUNDESAMT 1998). Arsen ist ein Zellgift, das die Oxidationsfähigkeit der Zellen hemmt, dabei treten akute und chronische Nebenwirkungen auf. Diese betreffen das Atmungssystem, den Magen- Darmtrakt, das Herz- Kreislaufsystem, das Nervensystem und die blutbildenden Organe (SAGNER 1973: in HEINRICHS 1996: 23).

In höheren Dosen aufgenommenes Arsen wirkt im Organismus krebserregend und toxisch. Dabei zeigen anorganische Arsenverbindungen eine höhere Toxizität als organische (TRETNER 2002: 10) und die 3-wertigen Verbindungen sind toxischer als die 5-wertigen (Salze der arsenigen Säure (Arsenite) und Arsensäure (Arsenate)) (WILHELM: in UMWELTBUNDESAMT 1998). Die organischen Trimethylarsin-Verbindungen (Hauptbestandteil der Arsenverbindungen in Meeresprodukten) sind nur geringfügig toxisch und werden vermutlich schnell und unverändert aus dem Körper ausgeschieden. (DE GIETER in : UMWELTBUNDESAMT 1998). Das metallische Arsen und die Arsensulfide sind Aufgrund der schlechten Löslichkeit nahezu ungiftig (TRETNER 2002: 11).

In beinahe allen Lebensmitteln sind geringe Arsenkonzentrationen zu finden. Die meisten Lebensmittel haben Arsengehalte unter 50 $\mu\text{m}/\text{kg}$, dabei weisen Meeresprodukte eine deutlich höhere Konzentration (im mg/kg Bereich) von organischen Arsenverbindungen (Arsenocholin, Arsenobetain und Arsenozucker) auf (DE GIETER et. al. In: UMWELTBUNDESAMT 1998).

Die, durch Nahrungsmittel und inhaliert aufgenommenen, organischen und anorganischen Arsenverbindungen werden zum Großteil resorbiert und im gesamten Körper schnell verteilt. Innerhalb weniger Stunden wird das Arsen aus dem Blut entfernt. Die höchsten Konzentrationen werden in den Muskeln, Nieren, der Lunge und in den Knochen beobachtet. Bei noch höheren Mengen wird das Arsen in der Haut, in den Haaren und in den Nägeln akkumuliert (WILHELM: in UMWELTBUNDESAMT 1998). Dieses bestätigt ein aus Taiwan bekannt gewordenes Krankheitsbild, „Black foot disease“ (Schwarz Fuß - Krankheit) genannt, das durch im Trinkwasser vorhandene hohen Arsenkonzentration hervorgerufen wurde, wobei die Extremitäten, vor allem die Füße, schwarz gefärbt waren und die Amputation dieser, war oft die einzige Rettung der Patienten (TRETNER 2002: 11).

Generell kann man beobachten, dass die schädigende Wirkung des Arsens stark von der vorliegenden Verbindung abhängig ist (MARQUARDT & SCHÄFER: in RÜDE 1996: 10) und die Toxizität im menschlichen Körper wird von der Oxidationsstufe und Löslichkeit beeinflusst (TRETNER 2002: 11).

3.3 Herstellung, Verwendung

Der Rohstoff Arsenik (Arsentrioxid As_2O_3) wird v. a. als Beiprodukt aus den Kupfer- und Bleierzverhüttungen gewonnen. Die jährliche Weltproduktion betrug 1989 etwa 53000 t (ISHIGURO 1992: in RÜDE 1996: 12).

In der Landwirtschaft werden Arsenverbindungen weltweit in vielen Bereichen eingesetzt wie zur Schädlingsbekämpfung (z.B. Rattengift), als Pestizide (z.B. Weinanbau), Herbizide (Baumwollanbau) und Fungizide (Holzschutzmittel). Arsen wird in der Glasindustrie zur Entfärbung und in der Metallindustrie, als Legierungsbestandteil zum Härten von Blei- und Kupferlegierungen eingesetzt. In Deutschland dürfen Arbeitsstoffe mit mehr als 0,3 Gew.-% Arsengehalt (nach der Gefahrstoffverordnung 1986) nicht mehr eingesetzt werden (u.a. für Farb- und Anstrichmittel, Pflanzenschutz- und Schädlingsbekämpfung, Verpackungsglas für Lebensmittel und für Lederherstellung) (LAI 1993: in UMWELTBUNDESAMT 1998). Im weltweiten Verbrauch des Arsens werden 50 % für Pestizide und weitere ca. 30 % für Holzschutzmittel verwendet (MATSCHULLAT 2000 in: UMWELTBUNDESAMT 1998).

Insgesamt darf man nicht vergessen, dass viele Heilmittel und Medikamente Arsen enthalten. Die bekannte FOWLER'S Lösung (1 %-ige Lösung von Arsentrioxid) wurde meist u.a. gegen Leukämie, Schuppenflechte und chronisches Bronchialasthma eingenommen (UMWELTBUNDESAMT 1983: in HEINRICHS 1996: 5). Heute werden diese Stoffe wegen der starken Nebenwirkungen meist durch Antibiotika ersetzt (nach SQIBB & FOWLER 1983: in RÜDE 1996: 13).

3.4 Sorption von Arsen im Boden

Schwermetalle kommen im Boden unspezifisch als pflanzenverfügbar, austauschbar und spezifisch adsorbiert vor (MANZ 1995: 16). Wichtige Komponenten bei der Ionenadsorption sind die Tonminerale, Huminstoffe und die pedogenen Oxide. Entscheidend für die Adsorption ist die negative Ladung dieser Bodenkomponenten, wobei deren Ladung stark von der Bodenreaktion (pH-Wert) abhängt. In der Abbildung 3.2 sind verschiedene Möglichkeiten der Ionensorption zusammengefasst. Es wird zwischen außer- und innersphärischen Komplexen unterschieden. In den außersphärischen Komplexen (unspezifische Sorption) werden die Ionen

elektrostatistisch gebunden und hydratisiert (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1998: 92). Die unspezifische Sorbtion ist pH-Wert abhängig und kommt vor allem bei Tonmineralen und bei organischen Substanzen vor (MANZ 1995: 16).

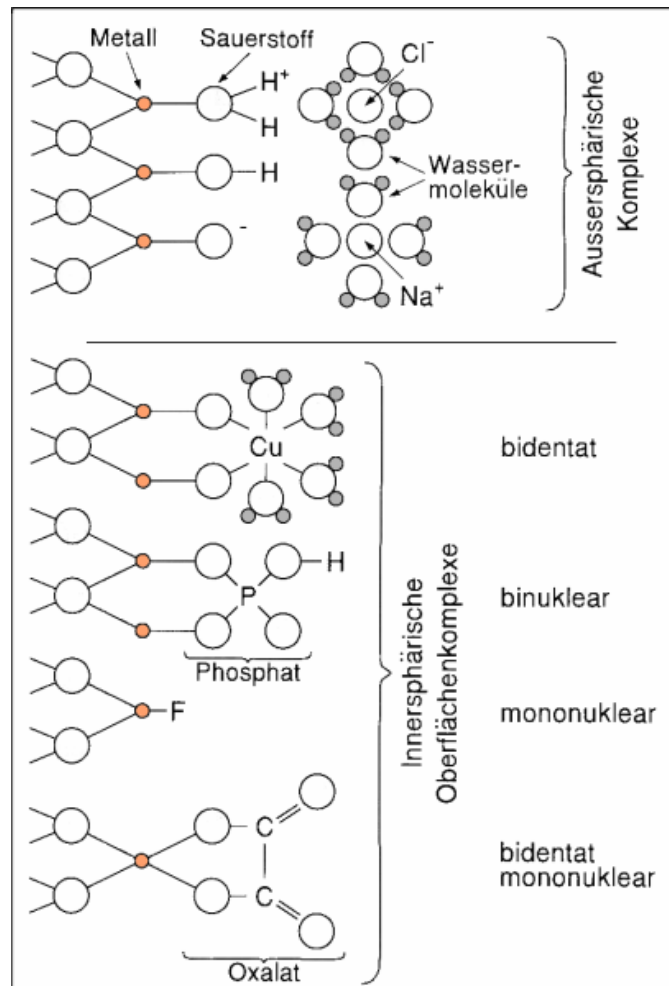


Abb. 3.2: Schematische Darstellung der Sorbtion von Kationen und Anionen an einer Oxid- oder Tonmineraloberfläche mit variabler Ladung, nach SIGG & STUMM, (1992) modifiziert

Bei den innersphärischen Komplexen (spezifische Sorbtion) können die Schwermetalle fester gebunden werden, da neben elektrostatischen noch zusätzlich kovalente Bindungskräfte bestehen und diese können je nach ihrer Koordination weiter in mono- und bidentale Komplexe bzw. mono- und binukleare Komplexe unterteilt werden (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1998: 92). Wie in der Abbildung 3.2 dargestellt, kann das sorbierte Ion entweder direkt oder über Sauerstoffbrücken mit der Metalloberfläche gebunden werden (TRETNER 2002: 25). Arsenat kann durch Ligandenaustausch gegen OH-Gruppen ersetzt werden und dadurch spezifisch sorbiert vorliegen (MANZ 1995: 17).

Tonminerale sind durch Verwitterung entstandene sekundäre Silikate. Sie sind kristalline, OH-haltige Al-Mg-Fe-Silikate mit einem, meist blättchenförmigen Habitus (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1998: 11) und können in Abhängigkeit vom pH-Bereich im alkalischen Milieu eher Kationen, im saueren Bereich eher Anionen sorbieren (JORDAN 1994: 13).

Die von JORDAN (1994) durchgeführte Untersuchung zeigte, dass der größte bestimmende Faktor für die Adsorption von Arsen an Tonmineralen der pH-Wert ist, und eine unspezifische Adsorption im sauren Milieu erfolgt.

Huminstoffe sind hochmolekulare organische Verbindungen und können auf der Basis der Lauge- bzw. Säurelöslichkeit in Fulvosäure, Huminsäure und Humine getrennt werden (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1998: 52).

Fulvosäuren sind alkalilösliche und nicht säurefällbare Teile der organischen Substanz und haben ein niedrigeres Molekulargewicht als die Huminsäure. Fulvosäuren und ihre Salze (Fulvate) sind teilweise wasserlöslich und können Mn(IV)-Oxide und Fe(III)-Oxide durch Reduktion lösen und Metallionenkomplexe bilden. In Böden liegen Fulvosäuren meist in adsorbierter Form z.B. an Eisen- und Aluminiumoxide, Tonminerale gebunden vor (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1998: 52).

Huminsäuren sind im sauren Bereich unlöslich und bilden mit mehrwertigen Kationen schwerlösliche Verbindungen, die Humate. Huminsäuren können aus dem alkalischen Bodenextrakt durch starke Säuren (H_2SO_4 , HCl) ausgefällt werden (SCHLICHTING et. al. 1995: 174).

Humine sind in kalter Natronlauge ein unlöslicher Bestandteil der Huminstoffe, aber auch Teile derjenigen Huminstoffe, die so stark an Tonmineralen gebunden sind, so dass sie nicht mit kalter Natronlauge extrahiert werden können (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1998: 53).

Die Sorption von Eisen- und Mangan-Oxiden/Hydroxiden können durch die Redoxprozesse des Arsens im oxischen und suboxischen Milieu beschrieben werden. Dies wird wie folgt nach TRETNER (2002) erklärt.

Im oxischen Milieu (Abbildung 3.3 a) wird das As(III) durch Mn-Oxide zu As(V) oxidiert und an der Manganoxid-Oberfläche sorbiert. Mn(IV) wird dabei reduziert und geht in Lösung. Durch den in der Lösung vorhandenen Sauerstoff kann das Mangan wieder zu Mn(IV) rückoxidiert und der Lösung wieder entzogen werden. Aufgrund der relativ schwachen Bindung an der MnO_2 -Oberfläche kann das As(V) wieder in Lösung gehen.

Das an Eisenoxiden und -hydroxiden sorbierte Arsen(III) wird der Lösung entzogen und im Fall einer Oxidation zu As(V), kann dabei das Eisen zu Fe(II) reduziert werden,

in Lösung gehen, aber durch Sauerstoff sofort zu Fe(III) oxidiert, wird es der Lösung entzogen.

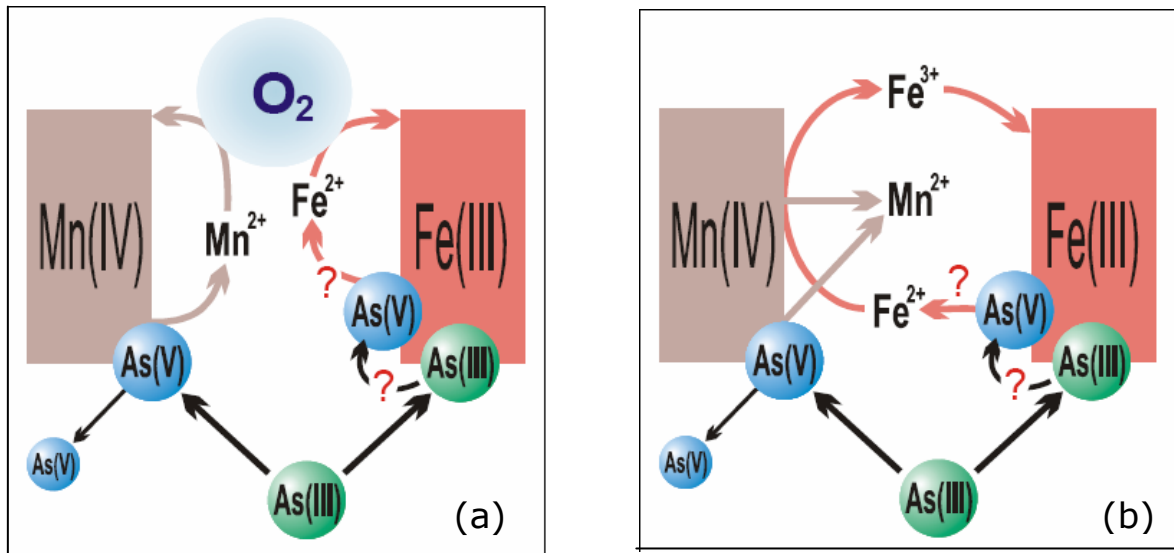


Abb. 3.3: As(III)-Oxidation in einem oxischen (a) und suboxischen (b) Grundwassermilieu, nach TRETNER (2002)

Die Reaktion im suboxischen Milieu (Abbildung 3.3 b) unterscheidet sich nur in einem entscheidenden Punkt vom oxischen Milieu. Durch den fehlenden gelösten Sauerstoff. Die entstandenen reduzierten Mn^{2+} -Ionen bleiben in der Lösung.

Die Oxidation an den Eisenhydroxidflächen verläuft wie im oxischen Milieu, mit dem Unterschied, dass die in Lösung gegangene Fe^{2+} -Ionen durch MnO_2 wieder zu Fe(III) oxidiert und der Lösung entzogen werden können.

Der Ionenaustausch erfolgt reversibel, in äquivalenten Mengen und ist charakterisiert durch die Verteilung der verschiedenen Stoffe auf Lösung und Austauscher (SCHLICHTING et. al. 1995: 111).

4 MATERIAL UND METHODEN

In dem folgenden Kapitel werden die bei den Geländearbeiten und Laboranalysen verwendeten bzw. durchgeführten Untersuchungen hinsichtlich ihrer Methodik zunächst kurz erläutert.

4.1 Probenentnahme und Beschreibung der Bodenprofile

Die Standorte wurden nach der vom GLA durchgeführten Vorerkundung zu den Arsengehalten im Erdinger Moos ausgewählt. Die drei Standorte der Bodenprofile sind in Abbildung 4.1 festgehalten.

Neben der Vermessung und Beschreibung der landwirtschaftlichen Nutzung des Geländes erfolgte die Aufnahme und Dokumentation der Profile über Skizzen und Fotos. Die Bodenansprache wurde gemäß der Bodenkundlichen Kartieranleitung (AG BODEN 1994, verändert nach GLA) und der MUNSELL SOIL COLOR CHARTS und ROCK COLOR CHARTS (1994) vorgenommen. Die kartographische Erfassung der Standorte erfolgte mit GPS und Kompass.

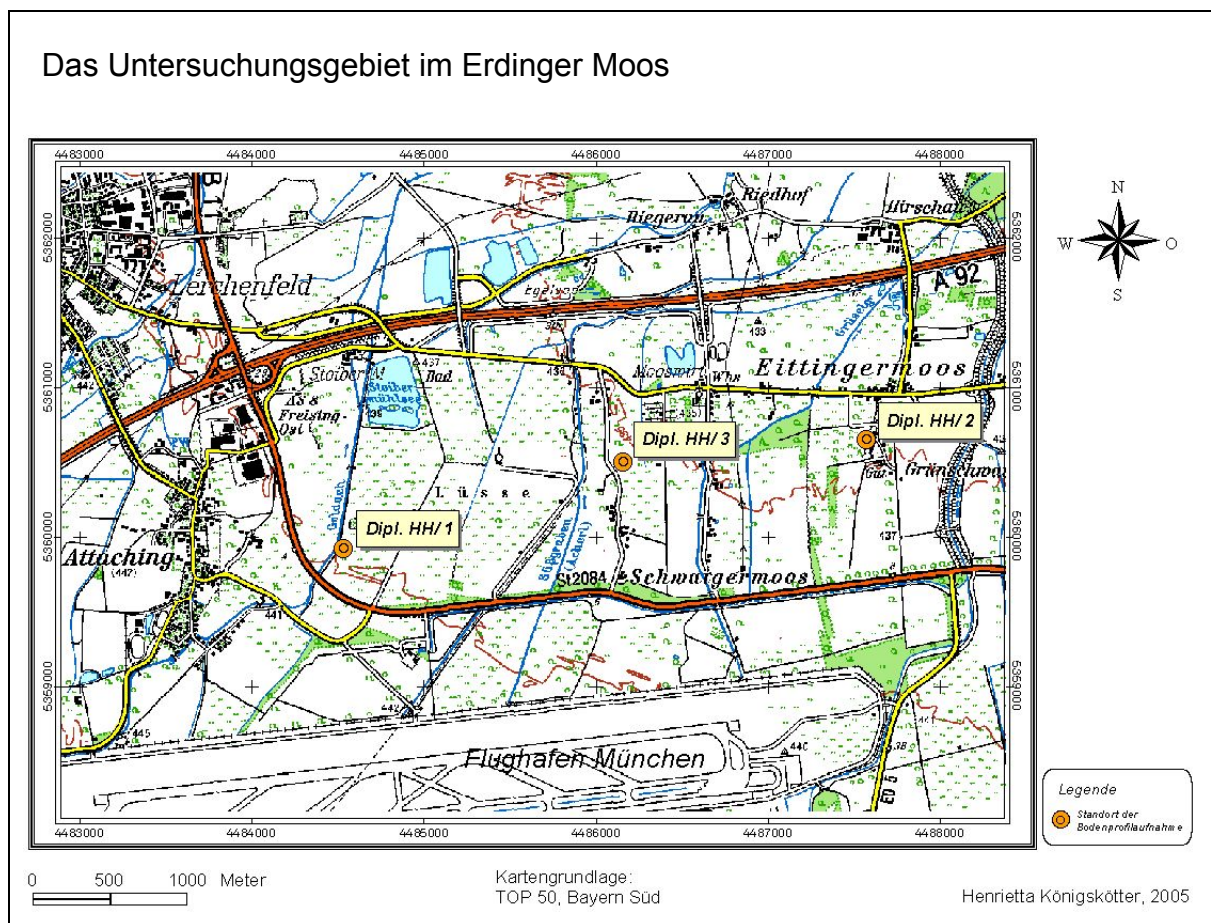


Abb. 4.1: Das Untersuchungsgebiet im Erdinger Moos. Angegeben sind die Standorte der Bodenprofile (Kartengrundlage TOP50, Bayern Süd)

Die Bodenproben für die Laboranalyse wurden je Horizont als Mischprobe des gesamten Horizontes entnommen.

Da die Bodenprofile in ein laufendes Projekt des GLA aufgenommen wurden, sind deren Bezeichnungen nicht fortgesetzt, sondern zur besseren Unterscheidung mit der Kennzeichnung Dipl. und mit meinen Initialen (HH) bezeichnet. Die Profile wurden dann fortgehend nummeriert.

4.1.1 Profil HH/1

Das Bodenprofil mit der Bezeichnung Dipl. HH/1 wurde am 10.02.2004 aufgenommen. Bei der Standortauswahl wurde der vom GLA festgelegte Hotspot- Bereich mit den höchsten Arsenkonzentrationen berücksichtigt. Die Abbildung 4.2 zeigt das Gelände der Probennahmen in einer nordöstlichen Ausrichtung.

Der Standort liegt östlich von Attaching. In der Bodenschätzungskarte von 1958 ist die Fläche als landwirtschaftlich nicht intensiv genutzt (Grünland) ausgewiesen.

Im Bodenprofil wurden die folgenden 6 Horizonte: Ah/ Ah-Go/ nHv/ nHw/ Gcr1/ Gcr2 unterschieden und in der Abbildung 4.3 mit ihren ergänzenden Erläuterungen dargestellt. Es wurde ein Kalk- Schnelltest an allen Horizonten mit verdünnter Salzsäure (3 mol/l – 10%-ige Salzsäure, HCl) durchgeführt. Nach der bodenkundlichen Aufnahme wurde die Bodenform annähernd bezeichnet.

Da die Humusform im Gelände nur schwer von Tonpartikeln zu unterscheiden ist, und die Mächtigkeit des Torfhorizontes weniger als 3 dm beträgt, wurde die Bodenform als Kalkanmoorgley klassifiziert. Die späteren Laboranalysen bestätigten die Geländeaufnahme, weil der Anteil des organischen Materials in den Torfhorizonten weniger als 30 % beträgt.

Den Untergrund (Gcr1 u. Gcr2) bilden holozäne kalkreiche Flussmergel. Darüber liegen die Torfhorizonte, dann ein Ockerhorizont mit Oxidationsmerkmalen und ein mineralischer Oberbodenhorizont mit einer Humusakkumulation. Das Datenblatt mit der Bodenansprache ist dem Anhang 1.1 zu entnehmen. Wegen ungünstigen Witterungsverhältnissen wurden die Untersuchungen am nächsten Tag im Labor fortgesetzt.

Der Ockerhorizont enthält eine hohe Eisenakkumulation, die für die weiteren Laboranalysen, bezüglich der Auswertung der Arsenanreicherung wichtig ist.



Abb. 4.2: Standort des Bodenprofils Dipl. HH/1 in nordöstlicher Richtung. Im Hintergrund ist die Tertiäre Hügellandschaft zu erkennen (10.02.2004)

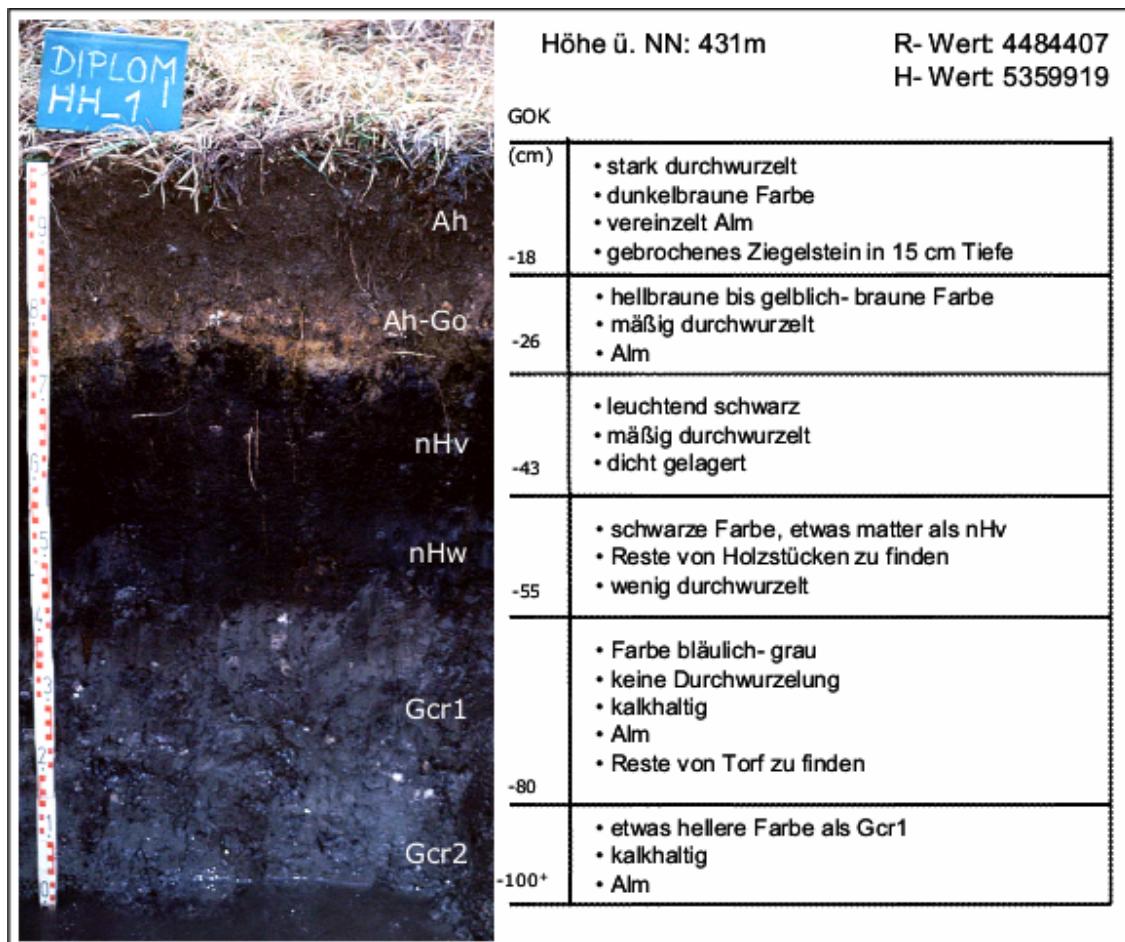


Abb. 4.3: Profil Dipl. HH/1 – Kalkanmoorgley aus vererdeten Niedermoor mit Alm- und Ockerausfällungen

4.1.2 Profil HH/2

Auf dem Gelände des Versuchsguts Grünschwaige der TU München wurde das Profil Dipl. HH/2 am 31.03.2004 aufgenommen. Laut Aussage eines Mitarbeiters des Gutshofes stand in unmittelbarer Nähe der Profilaufnahme vor ca. 15 Jahren ein Viehstall mit Hühnern. Eine dankbare Information, die sich in der folgenden Oberbodenansprache widerspiegelt. Wie in Abbildung 4.4 zu erkennen ist, sieht man dem Gelände die ehemalige Nutzung nicht an. Die Fläche wird vorwiegend als Grünland und als Weideland genutzt.

Nach der Bodenansprache Vorort konnten 4 Horizonte (Ah/ nHv/ Gor/ Gcr) unterschieden werden. Das Grundwasser wurde bereits in einer Tiefe von -47 cm (GOK) angetroffen. Mit Ausnahme des Torfhorizontes (nHv) sind alle Horizonte des Profils kalkhaltig bis kalkreich.

Im Gelände wurde die Bodenform als Niedermoor bezeichnet, dies wurde nach der endgültigen Datenauswertung nicht bestätigt, da der Torfhorizont weniger als 30 % organisches Substrat enthält. Die Bodenart (Korngrößenzusammensetzung des mineralischen Bodenmaterials) wurde durch die Fingerprobe bestimmt. Das Formblatt dazu ist im Anhang 1.2 zu finden.

Die Oxidationsmerkmale des Gor- Horizontes (Siehe dazu die Abbildung 4.5) sind auf den Grundwasserschwankungsbereich zurückzuführen. Der Horizont wird ebenso wie der darunter liegende Unterboden aus stark karbonathaltigen Kiesen gebildet. Zwischen den Kiesen und Geröllen befindet sich schluffig- lehmiges Material, das vorwiegend durch Verwitterung der Kiese entstanden ist.

Gegenüber den gerundeten Kiesen im Untergrund weist der darüber liegende Gor- Horizont vorwiegend kantig- und kantig gerundeten Kiese auf. Die Erklärung dafür liegt vermutlich an der unterschiedlichen Schüttungsperiode des Fließgewässers.

Die Feinkiese des Oberbodens sind wahrscheinlich anthropogener Herkunft und als Reste des ehemaligen Hühnergeheges zu deuten, da das Material aus Quarzkiesen und nicht wie der Unterboden aus Karbonatkiesen besteht.



Abb. 4.4: Standortkundliche Geländeaufnahme bei dem Profil Dipl. HH/2 in nordwestlicher Richtung

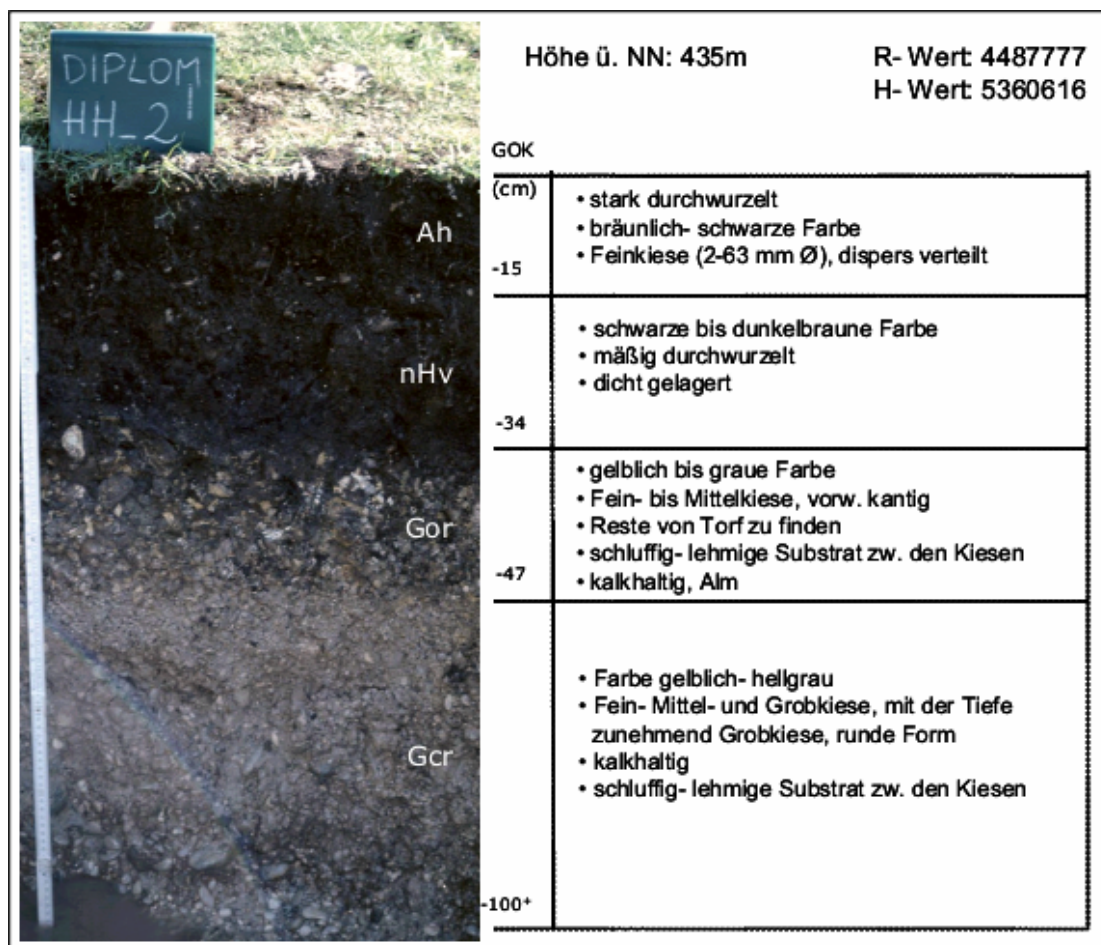


Abb. 4.5: Profil Dipl. HH/2 – Anmoor mit flacher Mineralbodendecke über Torf und Karbonatkies

4.1.3 Profil HH/3

Die Auswahl des Standortes fiel auf das Gelände zwischen den ersten beiden Profilen. Die Abbildung 4.6 stellt den Standort des Bodenprofils Dipl. HH/3 in Richtung Westen dar. Die Aufnahme erfolgte am 20.04.2004.

Das gesamte Gelände wird seit mindestens 30 Jahren nur zur Streugewinnung für Vieh genutzt. Der hohe Grundwasserstand läßt kaum eine andere Nutzung zu. Dieses bestätigte ein bei der Begehung anwesender Landwirt.

Die drei Torfhorizonte (nHvm, nHcv und eHw) entstanden auf kalkreichem Flussschotter (Gcr). In der Abbildung 4.7. wird die Profilwand mit ihren besonderen Merkmalen, die während der Geländearbeit notiert wurden, dargestellt.

Das Grundwasser wurde bei -78 cm (GOK) erreicht. Der durchgeführte Kalk-Schnelltest zeigte, dass außer dem nHvm- Horizont alle Horizonte kalkhaltig bzw. kalkreich sind. Die Ergebnisse bestätigten sich in Laboranalysen. Im Anhang 1.3 ist das Formblatt für die bodenkundlichen Aufnahme zu finden.

Der Torfhorizont eHw enthält viel organisches Material, vorwiegend Schneckenhäuser. Da die Schalen der Tiere vorwiegend aus Kalziumkarbonat bestehen, wird der Kalkgehalt, solcher mit organischen Bestandteilen angereicherter Bodenhorizonte, oft überschätzt (AG BODEN 1994).

Das Vorhandensein der zahlreichen Schneckenhäuser weist auf das Ablagerungsmilieu im Uferbereich eines Stehgewässers mit üppigem Pflanzenbewuchs hin.

Der Feinboden dieses Horizontes (eHw) ist lehmig- schluffig und dicht gelagert. Die dunkle fast schwarze Farbe wechselt nach der Trocknung in ein hellbräunlich - grau über. Der Farbwechsel gibt den Hinweis, dass der Horizont nicht vorwiegend aus organischem Material (Humus), sondern aus stark tonigem Schluff (AG BODEN 1994) besteht.



Abb. 4.6: Standort des Profils Dipl. HH/3, mit Blick nach Westen

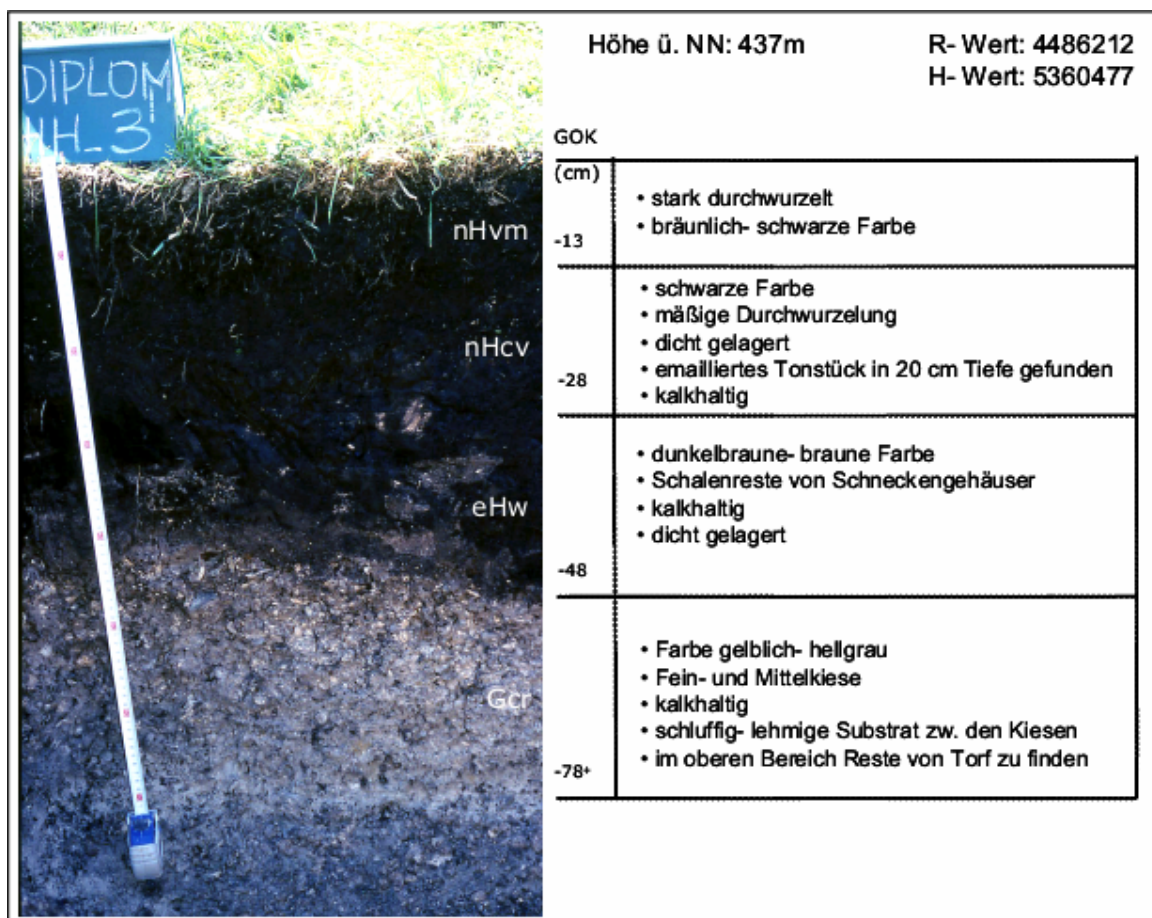


Abb. 4.7: Profil Dipl. HH/3 – Stark vererdetes Niedermoor über karbonatreichem Flussschotter

4.2 Laboranalysen

Für die Laboranalysen wurden die Bodenproben zunächst luftgetrocknet und anschließend mit einem 2mm- Sieb in Fein- und Grobboden unterteilt. Die Verteilung des Skeletts wurde vor Ort an den Bodenprofilen ermittelt (vgl. Anhang 1).

Die Probenvorbereitung (Sieben und Mahlen) erfolgte in den Aufbereitungsräumen (unter der Leitung von Herr Koller und Herr Viertler) des GLA.

Die nachfolgend beschriebenen Untersuchungen erfolgten eigenständig in den Laborräumen der Arbeitsgruppe Hydrogeologie (Department für Geo- und Umweltwissenschaften) der LMU München. Die Durchführung der Scheibler- Methode zur Karbonatgehalt-Bestimmung fand im Labor der Sektion Geographie und die Messung am CNS-Gerät im Labor des GLA statt.

4.2.1 Bodenchemische Untersuchungen

4.2.1.1 Bestimmung der Bodenreaktion

Die elektrometrische Ermittlung des pH-Wertes erfolgte nach DIN 19 684. Entsprechend des angegebenen Verfahrens wurden die feldfeuchten Proben mit Kalziumchlorid- Lösung (0,01 M) versetzt (1:2,5) und in Suspension gebracht. Die anschließende Messung erfolgte mit einem pH-Meter der Firma KNICK, Typ: 766 Calimatic. Im Anhang 2.1 sind die Messwerte tabellarisch gelistet.

4.2.1.2 Glühverlust und Glührückstand

Die Bestimmung des Glühverlustes und des Glührückstandes wurde gemäß DIN 19 684 Teil 3 durchgeführt. Die luftgetrockneten Proben wurden zunächst bei 105 °C im Trockenschrank bis zur Gewichtskonstanz getrocknet, nach Abkühlung im Exsikkator anschließend bei 550 °C im Muffelofen verglüht. Die Berechnung (in Gew.-%), siehe dazu Anhang 2.2, erfolgte nach den Formeln:

$$R = \frac{m_1 * 100}{m_2} \quad \text{und} \quad V = 100 - R$$

R	Glührückstand in Gew.-%
m_1	Masse des Glührückstandes in g
m_2	Masse der bei 105 °C getrockneten Probe in g
V	Glühverlust in Gew.-%

4.2.1.3 Spezifische elektrische Leitfähigkeit

In der S4 Analyse (Bestimmung der Eluierbarkeit mit Wasser) wurde im Eluat nach der Filtration (vgl. 4.2.2.1.1) die spezifische elektrische Leitfähigkeit gemessen. Die Messwerte sind im Anhang 2.3 dargestellt.

4.2.1.4 Bestimmung des Wassergehaltes der Böden

Die Bestimmung des Wassergehaltes der Böden erfolgte nach DIN 19 683, bezogen auf den bei 105 °C getrockneten Boden. Die Berechnung des Wassergehaltes ergibt sich aus folgender Rechnung:

$$W_g = \frac{G_f - G_t}{G_t} * 100$$

W_g	Wassergehalt in Gew.-%
G_f	Boden feucht in g
G_t	Boden getrocknet bei 105 °C in g

Aus den Ergebnissen der Wassergehaltsberechnung wurde der Trockenrückstand in Prozent ermittelt, da die Resultate bei Gehaltsbestimmungen auf die Trockensubstanz des jeweiligen Bodens bezogen sind. Der Trockenrückstandsfaktor wurde wie folgt berechnet:

$$W_T = \frac{100 - W_g[\text{Gew.} - \%]}{100} \quad (\text{SCHLICHTING et. al. 1995})$$

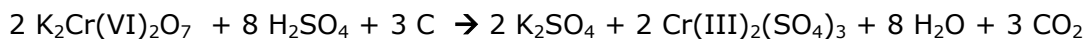
Im Anhang 2.4 sind die errechneten Werte tabellarisch erfasst und dargestellt.

4.2.1.5 Kohlenstoffgehalt- Bestimmungen

4.2.1.5.1 Humusgehalte

Die Bestimmung des Humusgehaltes erfolgte durch Analyse des C-Gehaltes nach DIN 19 684, Teil 2, mit dem Kaliumdichromat-Schwefelsäure-Verfahren. Diese Methode ist auch als nasse Veraschung (SCHICHTLING et. al. 1995: 159) bekannt.

In der Untersuchung wird der C-Gehalt bestimmt, in dem man den Humus nass verascht (Lichterfelder Methode), dabei wird der Humus mit flüssigem Oxidationsmittel zerstört. Anhand des Verbrauches an Oxidationsmittel wurde dann der C- Gehalt als organischer Kohlenstoff berechnet. Als Oxidationsmittel wurde Kaliumdichromat in Schwefelsäure (zur Verstärkung der Oxidationswirkung) verwendet (SCHLICHTING 1995). Das im Kaliumdichromat enthaltene Cr(VI) oxidiert die organische Substanz zu CO₂ und wird dabei selbst zu Cr(III) reduziert. Dabei läuft die folgende Reaktion ab:



(DURNER & NIEDER 2003). Der C-Gehalt wurde durch die Veränderung der Farbintensität des grünen Cr(III) Farbkomplexes spektralphotometrisch bestimmt.

Aufgrund des hohen Torfgehaltes der Böden wurde die Einwaage bei zu erwartenden stark humosen Horizonten entsprechend reduziert (Anhang 2.5 und 2.6.).

Für die Berechnung der Extinktionkoeffizienten (α_1 und α_2) wurde zunächst eine Kalibrierkurve erstellt. Die so ermittelten α_1 und α_2 - Werte wurden für die weitere Rechnung benutzt. Die kolometrische Bestimmung der entstehenden Cr³⁺-Ionen erfolgte mit einem Photometer bei 590 nm Wellenlänge.

Zur Feststellung der Eigenzersetzung des Kaliumdichromats wurden zwei Blindproben angesetzt.

Um eventuelle Fehlerquellen auszuschließen bzw. die Fehlerquote zu verringern, wurde ein Referenzboden mit bekanntem C- Gehalt zusätzlich in die Analyse mit einbezogen. Der Humusgehalt in Gew.-% ergibt sich über die folgende Berechnung:

$$C = \frac{1000 * V * \ddot{A}_2 * (E - \alpha_1 * c)}{e * \ddot{A}_1 * (\alpha_1 - \alpha_2 * F)}$$

C	Kohlenstoffgehalt in Gew.-%
V	Volumen des Messkolbens in ml
\ddot{A}_1	Äquivalentgewicht des Chrom(III)-Oxid (= 25,332)
\ddot{A}_2	Äquivalentgewicht des Kohlenstoffs (= 3,0028)
E	Extinktion der Probenlösung bei einer bestimmten Wellenlänge und konstanter Schichtdicke
F	Umrechnungsfaktor von Chrom(III)-Oxid in Kaliumdichromat (= 1,9356)
c	Cr- Gesamtkonzentration in g Kaliumdichromat/100ml (= 1,47096)
e	Probeneinwaage in mg
α_1	Extinktionskoeffizient von Chrom(III)
α_2	Extinktionskoeffizient von Chrom(VI)

Der angenommene Humusgehalt (C_{org}) von 50 %, eines Bodens mit mittlerem C- Gehalt, läßt sich durch Multiplikation mit dem Faktor 1,72 darstellen.

4.2.1.5.2 SCHEIBLER- Methode

Der Karbonatgehalt und der daraus abgeleitete Kohlenstoff als anorganischer C- Gehalt wurden über das Gasvolumen nach SCHEIBLER ermittelt (BARSCH, BILLWITZ & SCHOLZ 1984). Bei diesem Verfahren wird das luftgetrocknete Bodenmaterial in einem Entwicklungsgefäß mit verdünnter Salzsäure versetzt. Dabei reagieren die Karbonate nach dem folgenden Prinzip:



Das im Entwicklungsgefäß freigesetzte Kohlendioxid verdrängt das Wasser in einer U-förmig gebogenen, kalibrierten Bürette (Apparatur nach SCHEIBLER). An der Bürette kann man das Volumen des entwickelten Gases ablesen. Da im Allgemeinen Kalziumkarbonat im Boden überwiegt, wird der ermittelte Karbonatgehalt auf CaCO_3 umgerechnet.

Die Messung erfolgt mit einer Kalibrierprobe aus 100 %-igen CaCO_3 . Die vorherrschenden Luftdruck- und Temperaturverhältnisse müssen bei dieser Berechnung nicht berücksichtigt werden, sofern Temperatur und Druck konstant bleibt. Das Datenblatt im Anhang 2.7 gibt über die ermittelten Werte Auskunft.

4.2.1.6.2 Gesamtgehalt an Kohlenstoff

Der Gesamtanteil des Elements Kohlenstoff (Anhang 2.8) im Boden wurde mit Hilfe des automatischen Elementanalysegerätes der Firma Elementar Analysegeräte, Typ vario EL 1993 bestimmt. Dabei werden die Bodenproben bei 1150 °C vollständig verbrannt, das Gemisch der gasförmigen Reaktionsprodukte gereinigt, die Messkomponente mit Hilfe von Adsorptionssäulen getrennt und über die Infrarotabsorption des CO_2 -Gases analysiert.

4.2.2 Stoffgesamtgehalte in Böden

Bei den folgenden Untersuchungen wurden die Bodenextrakte auf die Gehalte der Elemente Arsen, Eisen und Mangan hin analysiert. Die Analyse des Arsens erfolgte mit der Hydridtechnik (Fa. Perkin Elmer, FIAS 400). Die gelösten Metalle Eisen und Mangan wurden an einem Flammen- AAS 3300 der Fa. Perkin Elmer bestimmt.

4.2.2.1 Bestimmung der Eluierbarkeit mit Wasser - S4

Die Eluierbarkeit mit Wasser wurde nach DIN 38 414, Teil 4 für As, Fe und Mn bestimmt (Anhang 2.9). Ermittelt wurden die Massenanteile der gelösten Stoffe bezogen auf die Originalproben (a) und bezogen auf den Trockenrückstand des Bodens (b) mit den folgenden Berechnungen:

$$\text{a) } W_{ES} = \frac{\beta * V_E}{m_s} \qquad \text{b) } W_{ET} = \frac{W_{ES}}{W_T}$$

W_{ES}	Massenanteil eines aus der wasserhaltigen Bodenprobe eluierten Stoffes in mg/kg
B	Massenkonzentration des eluierten Stoffes im Eluat, in mg/l
V_E	Volumen des filtrierten Eluats in l
m_s	Masse der eingewogenen Originalprobe
W_{ET}	Massenanteil des eluierten Stoffes bezogen auf den Trockenrückstand der Probe in mg/kg
W_T	Trockenrückstand der untersuchten Probe in %

Im Filtrat wurde neben Fe, Mn und As, die Gehalt der gelösten organischen Kohlenstoffe (dissolved organic carbon) mit dem Kohlenstoffanalysator TOC (Jena Analytik) ermittelt (Anhang 2.10).

4.2.2.2 Extraktion mit Ammonium- Nitrat

Zur Bestimmung der pflanzenverfügbaren Metallanteile wurden die Böden mit Ammoniumnitrat nach DIN 19 730 (1997) extrahiert. Die ermittelten Werte sind im Anhang 2.11 dargestellt. Für die Extraktion wurden feldfeuchte Bodenproben verwendet und die mobilen Massenanteile der Stoffe (in µg/kg) wie folgt ermittelt:

$$W_m = \frac{\beta_1 * V_{el} * (100 + W_T)}{E_f * 100}$$

W_m	Massenanteil des extrahierten Elements bezogen auf den Trockenrückstand
β_1	Die blindwertkorrigierte Massenkonzentration des extrahierten Elements im Extrakt, in µg/l
V_{el}	Das Extraktionsvolumen
E_f	Die Einwaage der Bodenprobe in g

4.2.2.3 Sequentielle Extraktionen

Zur Bestimmung der Bindungsformen des Arsens in den Böden wurde ein sequentielles Fraktionsverfahren nach ZEIEN & BRÜMMER (1989; 1991) verwendet. Das in dieser Arbeit verwendete Extraktionsschema wurde nach RÜDE (1996) verändert.

Die Grundlage der Extraktionsverfahren ist eine Fraktionierung nach der Mobilität (Fraktion 1) und den Bindungsformen (Fraktion 2 - 7) der Elemente in Böden (ZEIEN 1995).

Für die Extraktionen wurden 4 g luftgetrocknetes Bodenmaterial (< 2 mm) nacheinander mit je 40 ml Extraktionslösung entsprechend der jeweiligen Fraktion versetzt und wie in der Tabelle 4.1 aufgeführt behandelt. Anschließend wurden die Extrakte zentrifugiert und durch einen Filter dekantiert. Im folgenden Schritt wurde der verbleibende Rückstand der nächsten Fraktion unterzogen.

Vor der Durchführung des Königswasserauszugs (Fraktion 7) wurden die Proben wieder luftgetrocknet. Der Königswasseraufschluss der Residualfraktion erfolgte nach DIN ISO 11 466: 1997-06 im Reaktionsgefäß mit Rückflusskühler und Absorptionsgefäß.

Die luftgetrockneten Bodenproben wurden mit einer Salpetersäure/ Salzsäure-Kombination extrahiert, dabei wurden die Proben zuerst mit 37 %-iger Salzsäure (21 ml) und dann mit 7 ml 65 %-iger Salpetersäure versetzt. Zu den Bodenproben, die höhere Anteile an organischem Material aufwiesen, wurden zusätzlich noch 7 ml Salpetersäure gegeben. In das Absorptionsgefäß wurde weitere 10 ml Salpetersäure eingefüllt und die Apparatur zusammengebaut.

In jeder Fraktion wurden die As-, Fe- und Mn-Konzentrationen gemessen und aufsummiert (Anhang 3.1 - 3.3). Die in den Fraktionen ermittelten Arsen-Gehalte werden summiert und im Weiteren als Gesamtgehalte betrachtet.

Die Summe entspricht dem Arsen-Gesamtgehalt der Bodenproben, da As spätestens mit dem Königswasseraufschluß vollständig erfasst wird (RÜDE 1996). Da Silikate in diesem Verfahren nicht quantitativ gelöst werden, sind die summarischen Fe-, Mn-Gehalte prinzipiell nur Teilgehalte.

Für die Bestimmung der austauschbaren Anteile wurde Ammoniumfluorid (NH_4F) verwendet (1. Fraktion). In dieser Fraktion extrahierte Arsengehalte können als potenzielle Mobilisierungskapazität betrachtet werden (ZEIEN 1995).

Tab. 4.1: Sequentielle Extraktionsverfahren nach ZEIEN & BRÜMMER (1989), verändert nach RÜDE (1996)

Nr	Extraktionsmittel	Verfahren	Fraktion
1	0,5 mol/L NH_4F pH 7 mit NH_4OH eingestellt	5 Std. schütteln	austauschbar
2	0,1 mol/L NH_4OAc pH 5 mit HOAc eingestellt	5 Std. schütteln	karbonatisch gebunden
3	0,1 mol/L $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ + 1,0 mol/L NH_4OAc pH 6 mit HCl eingestellt	30 min schütteln	leicht reduzierbare v. a. Mn- Oxide
4	0,025 mol/L EDTA pH 4,6 mit NH_4OH eingestellt	90 min. schütteln	organisch gebunden
5	0,2 mol/L NH_4 - Oxalatpuffer pH 3,25	4 Std. im Dunkeln schütteln	gering kristallisierte Fe- Oxide
6	0,2 mol/L NH_4 -Oxalatpuffer + 0,1 mol/L Ascorbinsäure pH 3,25	30 min. bei 95°C im Sandbad erhitzen	gut kristallisierte Fe- Hydroxide,- Oxide
7	Königswasserauszug	DIN ISO 11466 : 1997-06	Residualfraktion

Die Extraktionsverfahren von ZEIEN & BRÜMMER (1989) wurde für mäßig karbonathaltige (< 5% CaCO_3) bis karbonatfreie Böden entwickelt. Aufgrund des hohen Karbonatgehalts der Proben wurde die Extraktionsabfolge um die Fraktion, die die karbonatischen Bindungen erfasst, ergänzt (2. Fraktion). Die Fraktionen 3, 5 und 6 wurden nach dem von SHUMAN et.al. (1985) vorgeschlagenen Verfahren durchgeführt.

Der Gesamtgehalt an Elementen wurde mit einem weiteren Verfahren in einem externen Labor durch ICP-MS nach Königswasseraufschluss ermittelt (Anhang 3.4). Die Bodenproben wurden fein gemahlen und für die Analyse in das Labor Activation Laboratories Ltd. (Kanada) geschickt.

4.2.2.4 Phosphataustauschbares Arsen

Das phosphataustauschbare Arsen wurde in Anlehnung an die Bestimmung der Kationenaustauschkapazität (DIN ISO 13 536: 1997-04) durchgeführt. Der Versuch erfolgte in zwei Schritten.

Im ersten Schritt wurde als Austauschion 0,25 M Natrium-Dihydrogenphosphat (35,814 g $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \times \text{H}_2\text{O}$ in 1 Liter Aqua deion.) eingesetzt.

5 g feldfeuchte Bodenproben wurden mit je 15 ml Extraktionslösung in Suspension gebracht und 24 Stunden geschüttelt. Anschließend 10 min bei 3000 g zentrifugiert und durch einen Filter dekantiert. Die Zugabe der Extraktionslösung, das Schütteln und Zentrifugieren wurden noch ein weiteres Mal mit einer Stunde Schüttelzeit wiederholt und die Extrakte in PE-Flaschen zusammengeführt und zur weiteren Analyse vorbereitet. Im Extrakt wurden der Phosphatanteil, mit einem Spektralphotometer bei 890 nm, und das Arsen (gesamt) durch die Hydridtechnik bestimmt (Anhang 3.5 u. 3.6).

Der Bodenrückstand wurde dann dem folgenden, zweiten Schritt unterzogen.

Im zweiten Schritt des Versuches wurde ein Arsen-Rücktausch durchgeführt. Als Austauschion wurde 0,05 M Arsenat (3,746 g $\text{AsHNa}_2\text{O}_4 \times 7 \text{H}_2\text{O}$ in 1 Liter Aqua deion.) eingesetzt. Die weitere Handhabung der Proben und auch die Extraktion verliefen wie im ersten Schritt und es wurden sowohl Phosphat als auch Arsen gemessen.

5 UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE UND DISKUSSION

5.1 Ergebnisse und Diskussion der Kohlenstoff- Analysen

Die Bestimmung der organischen Kohlenstoffe (C_{org}) erfolgte durch drei, sich voneinander unterscheidende Methoden.

Zuerst wurde der organische Anteil an Kohlenstoff durch Verglühen der Humusabbauprodukte ermittelt. Diese Methode kann Fehlerquellen aufweisen, wenn die Bodenproben höhere Ton- und Sesquioxidanteile enthalten und die Minerale bei 550 °C auch Kristallwasser abgeben (SCHLICHTING et. al. 1995). Die sehr hohen Werte sind wahrscheinlich auf diese Fehlerquelle zurückzuführen.

Vergleichsweise niedrigere Werte wurden durch die nasse Veraschung ermittelt. Analog zu einer Referenzprobe mit bekanntem C-Gehalt von 2,2 % wurden hier Werte von 2,31 und 2,34 % bestimmt, was im Toleranzbereich liegt. Aus diesem Grund scheinen auch die berechneten C_{org} -Gehalte der Bodenproben richtig zu sein. Aber auch hier lassen sich Fehlerquellen nicht ganz ausschließen.

Bei der Methode wird davon ausgegangen, dass die C-Gehalte völlig durch Kaliumdichromat oxidiert wurden. Diese Voraussetzung ist bei Bodenproben nicht gegeben, in denen Substanzen in oxidierbarer oder stark oxidierender Form oder bereits in oxidiert Form (z.B. COOH-Gruppen) gegeben sind (SCHLICHTING et. al. 1995). Da die Bodenproben in den humusreichen Horizonten auch höhere Eisengehalte in oxidiert Form aufweisen (vgl. 5.3.2) können die Ergebnisse nicht als Humusgehalt bzw. C_{org} angenommen werden, weil vermutlich nicht die kompletten organischen Kohlenstoff-Gehalte erfasst wurden.

Nach der Ermittlung von Gesamtgehalten des Kohlestoffes (C_{ges}) wurde der anorganische Anteil auch bestimmt, aus diesen Parametern wurde der organische Kohlenstoff von C_{ges} durch subtrahieren von C_{an} berechnet. Die Gesamtkohlenstoff-Gehalte wurden in einem Elementaranalysegerät mit Tagesfaktoren der zu bestimmenden Elemente (C, N, S) und mit Referenzproben gemessen. Die Werte der Referenzproben liegen alle im Toleranzbereich, dadurch können diese als C_{ges} angenommen werden.

Aufgrund des hohen Karbonatgehaltes der Böden wurde bei der Bestimmung des anorganischen Kohlenstoffgehaltes in der SCHEIBLER- Apparatur die Einwaage stark reduziert.

In der Abbildung 5.1 sind die Ergebnisse der drei Methoden untereinander im Vergleich dargestellt. Das Diagramm verdeutlicht, dass die ermittelten C_{org} - Werte

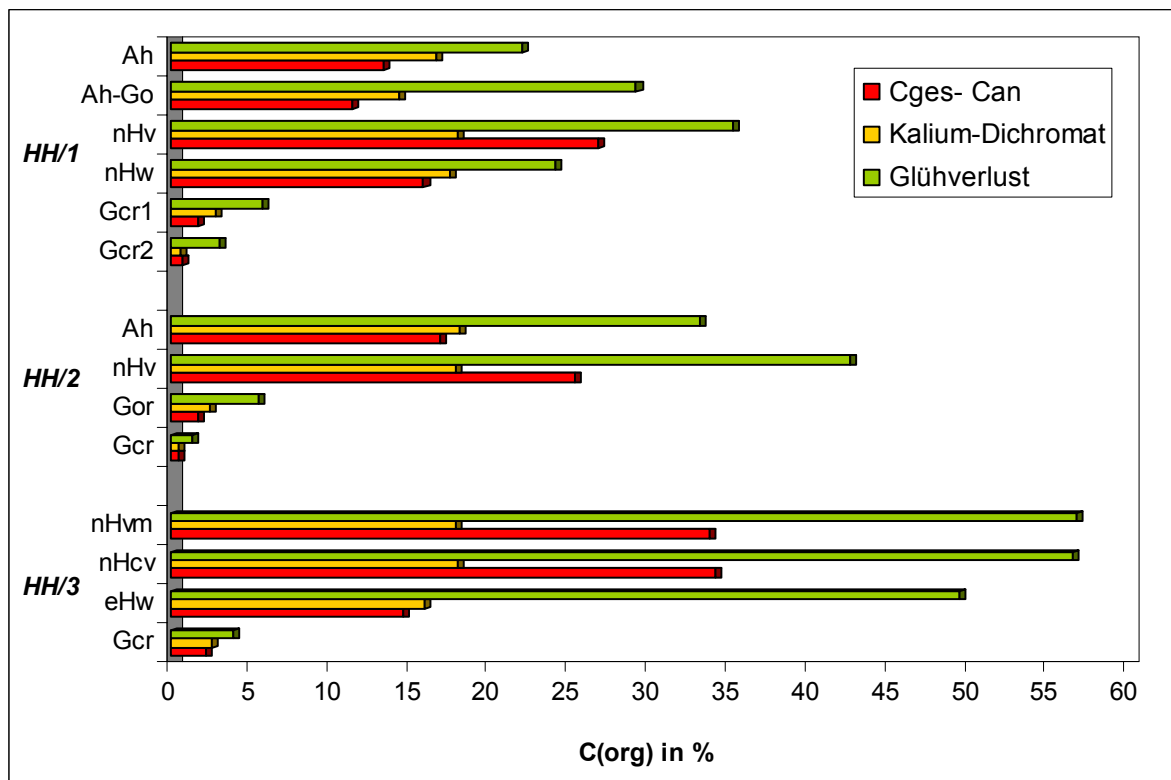


Abb. 5.1: Organische Kohlenstoffgehalte in den einzelnen Horizonten. Dargestellt sind die drei Bodenprofile mit den jeweiligen Horizonten und die ermittelten Werte der drei Messmethoden in Gew.-%

tiefenspezifisch in den einzelnen Horizonten abnehmen und die Daten der beiden letzten Methode durch einen ähnlichen Verlauf charakterisiert sind. Für die weiteren Vergleiche bzw. Korrelationen wurden die ermittelten C_{org} -Daten aus der $C_{ges} - C_{an}$ - Methode verwendet.

Die C_{org} -Gehalte liegen in den Ah-Horizonten um 15 % und erreichen in den H-Horizonten bis zu 34 %. Dagegen sind die Gehalte an C_{org} mit 0,7 – 2 % in den mineralischen Horizonten sehr gering.

Als Humus (Huminstoffe) wird die feste organische Substanz der Böden bezeichnet. Huminstoffe sind hochmolekulare organische Verbindungen, haben meist eine dunkle Farbe und bestehen unter anderen aus nicht spezifisch organischen Substanzen und aus spezifischen Humussubstanzen, wie Fulvosäuren, Huminsäuren und Humine. (vgl. Kap. 3.4) Neben den festen organischen Substanzen treten im Bodenwasser gelöste organische Kohlenstoffe (DOC) auf. Die Bildung von organischen Komplexen hat großen Einfluss auf die Löslichkeit von Metallen, vor allem Eisen und Aluminium, sowie die essentiellen und toxischen Schwermetalle. In Abhängigkeit vom jeweiligen Komplexbildner, reagiert die Löslichkeit der Metalle, im Gegensatz zu anorganischen

Lösungsgleichgewichten, auf Schwankungen im pH-Wert sehr sensibel. Darüber hinaus zeigt sich eine große Abhängigkeit vom Mol-Verhältnis des Metalls zum Komplexbildner (nach SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1998).

Die wasserlöslichen organischen Kohlenstoffanteile der Bodenproben wurden an der S4-Eluaten bestimmt. Sie sind relativ gering. Die Werte liegen im Bereich von 7,02 mg/l im Unterboden und erreichen 151,11 mg/l im Torfhorizont (siehe Anhang 4.10) und liegen damit im unteren Bereich der von SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (1998) beschriebenen Werte.

5.2 Analysedaten von Actlabs

Um die ermittelten As-, Fe- und Mn-Daten zu verifizieren werden diese in den Diagrammen (Abbildung 5.2 – 5.4) denen von Actlabs gegenübergestellt.

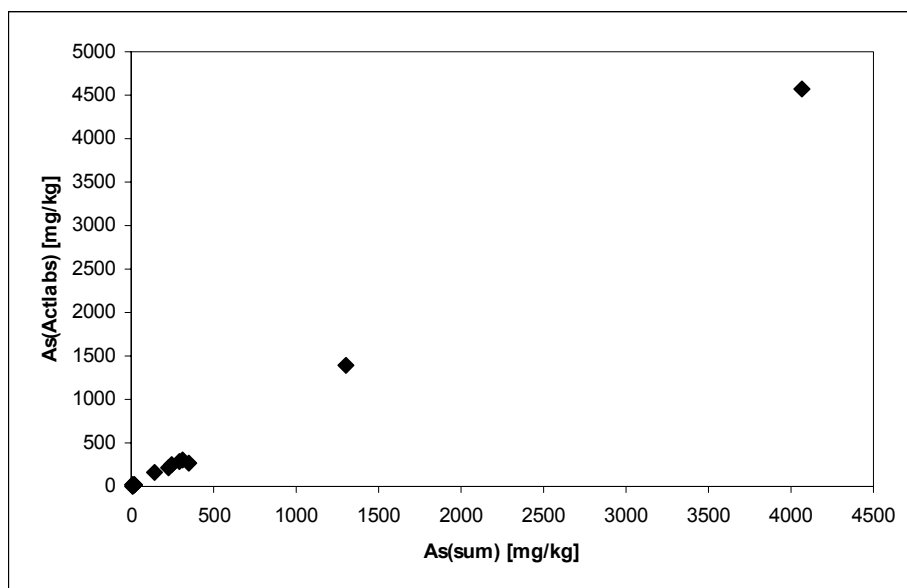


Abb. 5.2: Vergleich der Untersuchungsergebnisse von Arsen mit Actlabs- Werten

Die ermittelten Werte für Arsen (As_{sum}) stimmen mit den Actlabs-Daten zu 97,8 % überein. Der größte Unterschied (507 mg/kg TS: $As_{sum}=4063$ mg/kg; $As_{Actlabs}=4570$ mg/kg) wurde im Profil HH/1 des Ah-Go- Horizontes ermittelt.

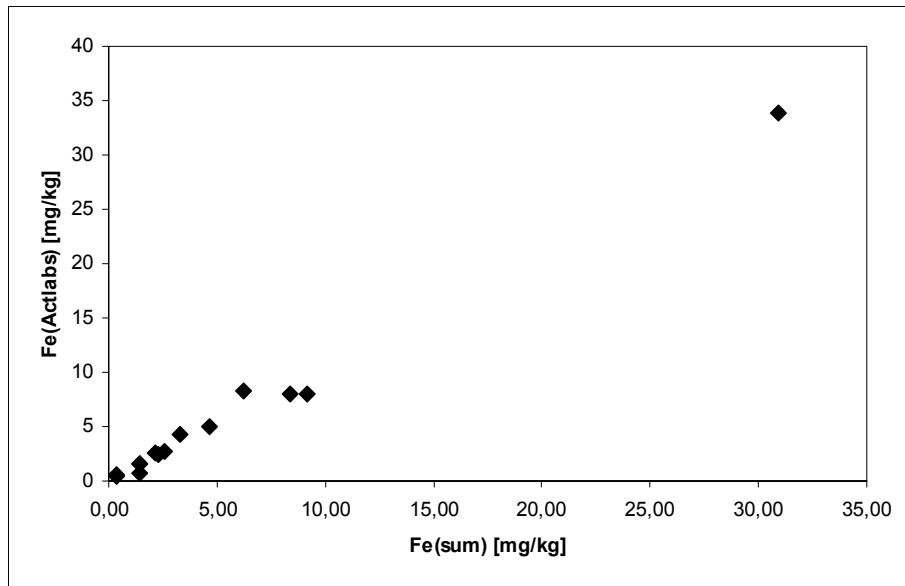


Abb. 5.3: Ergebnisse der Fe-Untersuchungen in Vergleich mit den Actlabsdaten

Die Übereinstimmung der Daten für Eisen beträgt 97,7 %. Bis auf zwei Werte im Ah-Horizont des Profils HH/1 und im Gcr-Horizont des Profils HH/2 zeigen die Actlabs-Daten geringfügig höhere Fe-Werte.

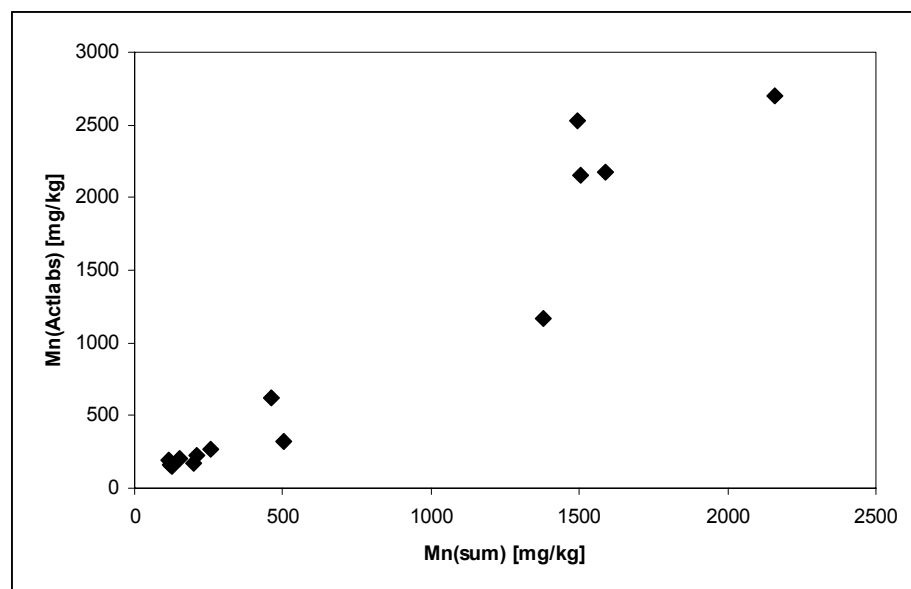


Abb. 5.4: Vergleich der Mangan- Ergebnisse mit den Actlabs- Daten

Im Allgemeinen zeigen die ermittelten Mn-Daten grössere Unterschiede zu den Actlabs-Werten auf. Die durchschnittliche Übereinstimmung der Daten beträgt nur 87,5 %. Dieses ist auf einen höheren silikatisch gebundenen Mn-Anteil der

Bodenproben zurückzuführen der von Actlabs berücksichtigt wurde. Da diese Fraktion hier nicht durchgeführt wurde, fehlen diese bei der Mn_{sum} -Berechnung und erklären den Unterschied.

Die Diagramme zeigen insgesamt eine hohe Übereinstimmung der Daten und die eigenhändig ermittelten As_{sum} -, Fe_{sum} - und Mn_{sum} -Werte halten der Verifizierung stand. Abweichungen können mit einer unterschiedlichen Homogenität der Proben, als auch mit leichten Abweichungen in der Analyse begründet werden.

5.3 Ergebnisse und Diskussion der sequentiellen Extraktionen

Zur Beurteilung der ökologischen Zusammenhänge von Schwermetallanreicherung in Böden wurden deren Bindungsformen ermittelt. In dieser Arbeit wurde ein optimiertes sequentielles Extraktionsverfahren nach ZELEN & BRÜMMER (1989), verändert nach RÜDE (1996), verwendet. Damit wurden Bindungsformen von Arsen, Eisen und Mangan in einer Abfolge, mit steigendem Säuregehalt der Extraktionslösungen, untersucht. Die Eigenschaften wie wasserlöslich, austauschbar, karbonatisch gebunden, organisch gebunden und in Fe-, und Mn-Hydroxide/Oxide okkludiert konnten damit nachgewiesen werden.

Im Folgenden werden die Fraktionsergebnisse der Fraktionen für die Elemente As, Fe und Mn beschrieben und diskutiert.

5.3.1 Arsen

Die Tiefenverteilung des Arsens in den Profilen wird in den nachfolgenden Diagrammen (Abbildung 5.5) dargestellt. Mit den höchsten As-Werten treten der Ah (1303 mg/kg) und der Ah-Go-Horizont (4063 mg/kg), des Profils Dipl. HH/1, in den Vordergrund. Die niedrigsten As-Gehalte sind bei allen Profilen im Unterboden festzustellen. Durchgängig ist zu beobachten, dass die humosen Horizonte hohe Arsengehalte aufweisen. Auffällig ist der hohe As-Gehalt der Ah-Go-Horizont des Profils HH/1 trotz des relativ geringen Humusgehaltes.

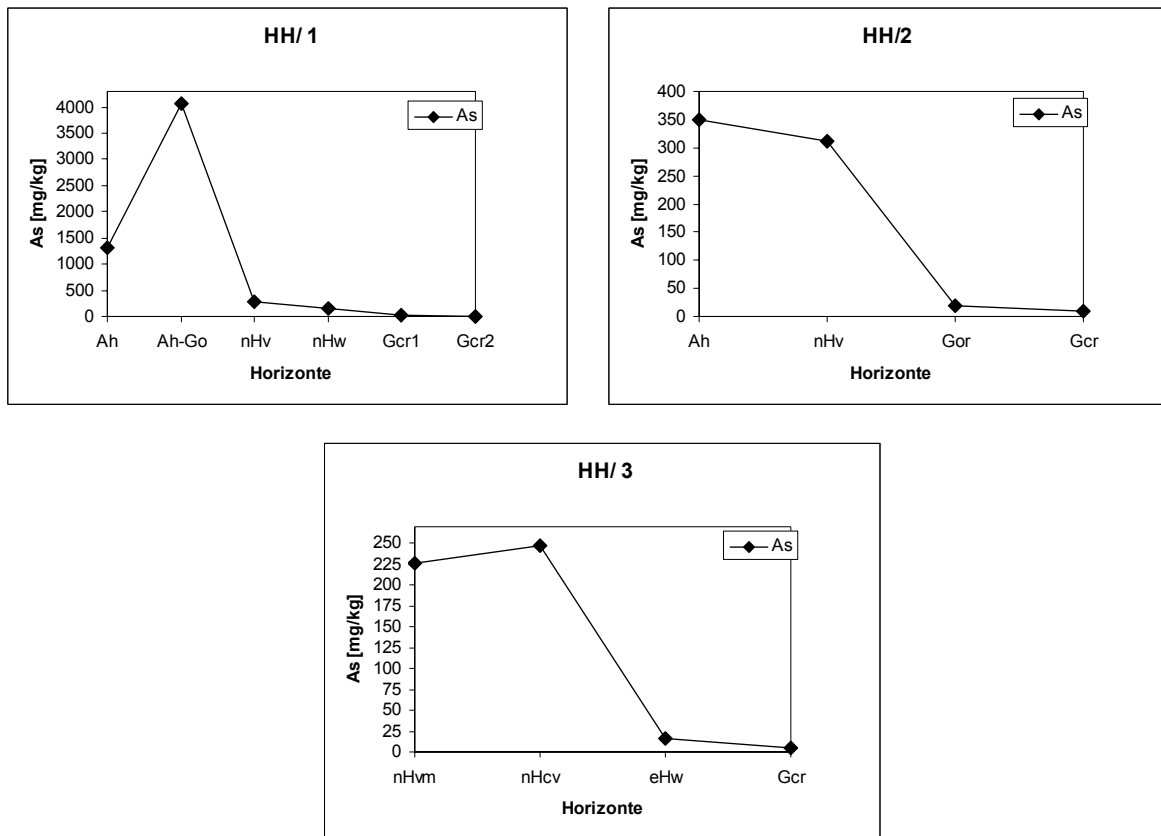


Abb. 5.5: Tiefenverteilung des Arsens in den Profilen. Dargestellt sind die absoluten (As_{ges} als Summe der einzelnen Fraktionen) Werte des As, bezogen auf die Bodenhorizonte.

Im Diagramm (Abb. 5.6) sind die relativen As- Anteile der einzelnen Fraktionen bezogen auf die Summe des Gesamtgehaltes der beprobten Horizonte dargestellt.

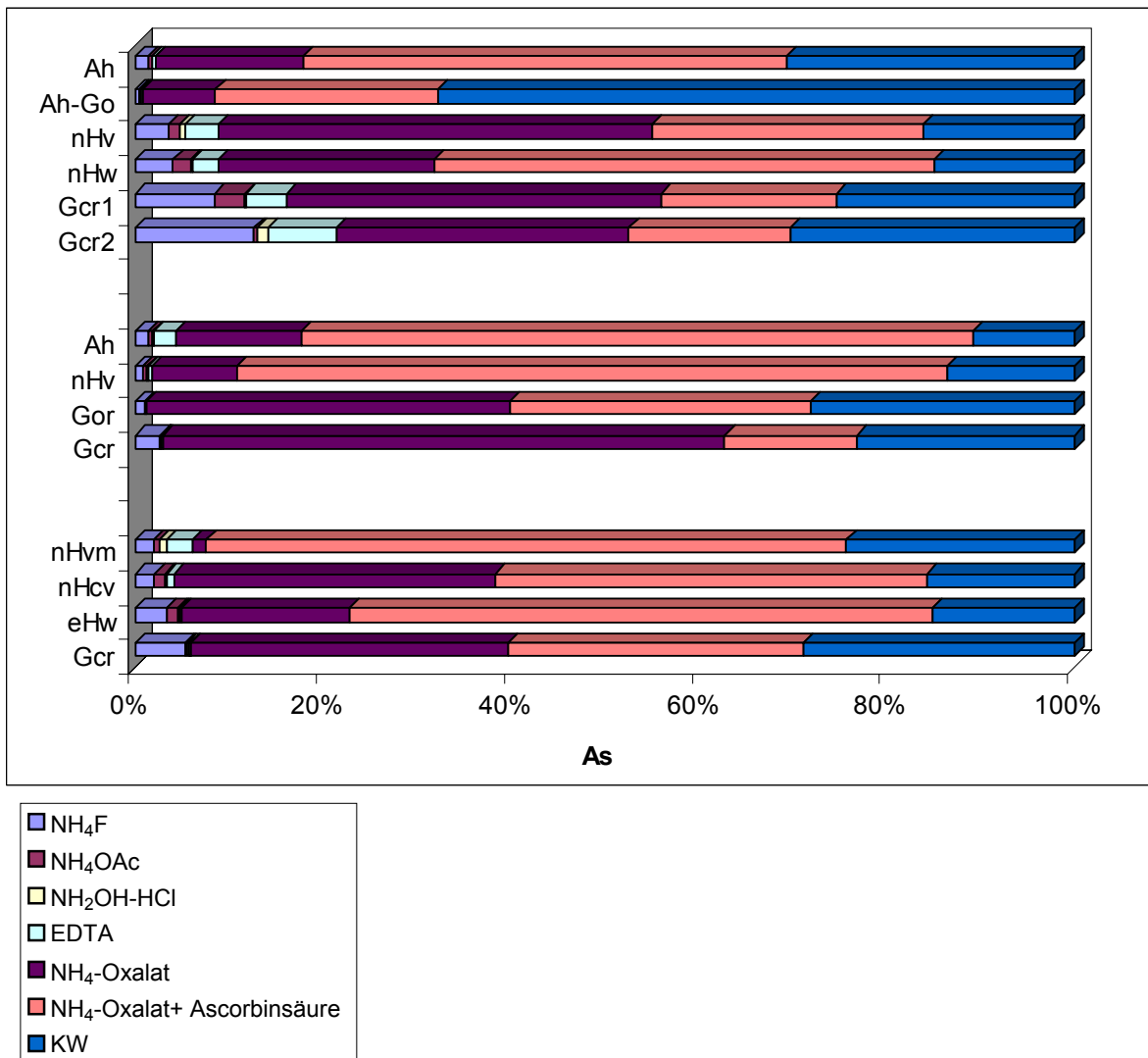


Abb. 5.6: Relative As- Anteile der einzelnen Fraktionen bezogen auf den Gesamtgehalt der beprobten Profilhorizonte. Die Profile sind von oben nach unten: HH/1, HH/2 und HH/3 dargestellt

Wasserlösliches bzw. unspezifisch adsorbiertes, leicht mit Fluor-austauschbares As (1. Fraktion) hat in den meisten Horizonten nur einen Anteil von wenigen Prozenten, nimmt mit der Tiefe in den redoximorphen Horizonten zu. Vor allem im Profil HH/1 ist dieses sehr ausgeprägt und As in dieser Fraktion erreicht dort bis zu 12,6 % entsprechend einer Konzentration von 1,15 mg/kg TS. Dies ist ein Indiz für die erhöhte Mobilität des Arsens im Grundwasserschwankungsbereich.

Die Arsengehalte betragen in der 2. bis 4. Fraktion nur wenige Prozent des Gesamtgehaltes. An Fe-Oxide/Hydroxide (5. bis 6. Fraktion) sind jedoch 51 bis 75 % gebunden. Mit dem Königswasseraufschluss werden 3 - 30 % des Gesamtgehaltes erfasst, in der Probe des Ah-Go-Horizontes im Profil HH/1 dagegen über 60 %.

Der letztgenannte Wert entstammt einem extrem Fe-Oxid-reichen Horizont (s. 5.3.2 Eisen), für den möglicherweise die Konzentration des zugereichten Oxalates nicht ausreichend war, um die Oxide vollständig aufzulösen. Dem entsprechend wird auch As in der Residualfraktion verblieben sein.

5.3.2 Eisen

Die pedogenen Anteile des Eisens in den Böden konnten in den beiden Oxalat-Extrakten (5. und 6. Fraktion) gut ermittelt werden. Das pedogene Eisen entsteht durch Verwitterung von Gesteinen und Mineralen und ist daher ein Maß für den Verwitterungsgrad der Böden. Der größte Teil des Eisens wird bei der Verwitterung in Fe(III)-Oxiden gebunden und färbt die Böden gleichmäßig braun oder rot. Unter anaeroben Bedingungen sind in reduzierender Form Fe^{2+} -Ionen gelöst. Sobald ein aerobes Milieu vorherrscht, wird das Eisen als Fe(III)-Oxid ausgefällt (nach SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1998). Dieser Prozess erklärt die hohen Fe-Konzentration im Ah-Go-Horizont des Profils HH/1. Eisenoxide haben außerdem die Eigenschaft, Anionen wie Phosphat, Chromat und Arsenat aber auch Schwermetalle stark an der Oberfläche zu binden (nach SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1998).

Die Tiefenverteilung des Eisens ist in der Abbildung 5.7 dargestellt. Es ist eine kontinuierliche Abnahme der Werte mit der Tiefe zu beobachten. Im Profil HH/1 sind hohe bis extrem hohe Werte (91,3 g/kg TS im Ah- bzw. 309 g/kg TS Fe im Ah-Go-Horizont) in den oberflächennahen Horizonten zu sehen. Die Fe-Werte sind im Bereich der humosen Horizonte des Profils HH/2 höher, als im Profil HH/3. Dort ist der Fe-Gehalt in dem ebenso humosen eHw-Horizont, der aber nicht so oberflächennah ist, stark reduziert.

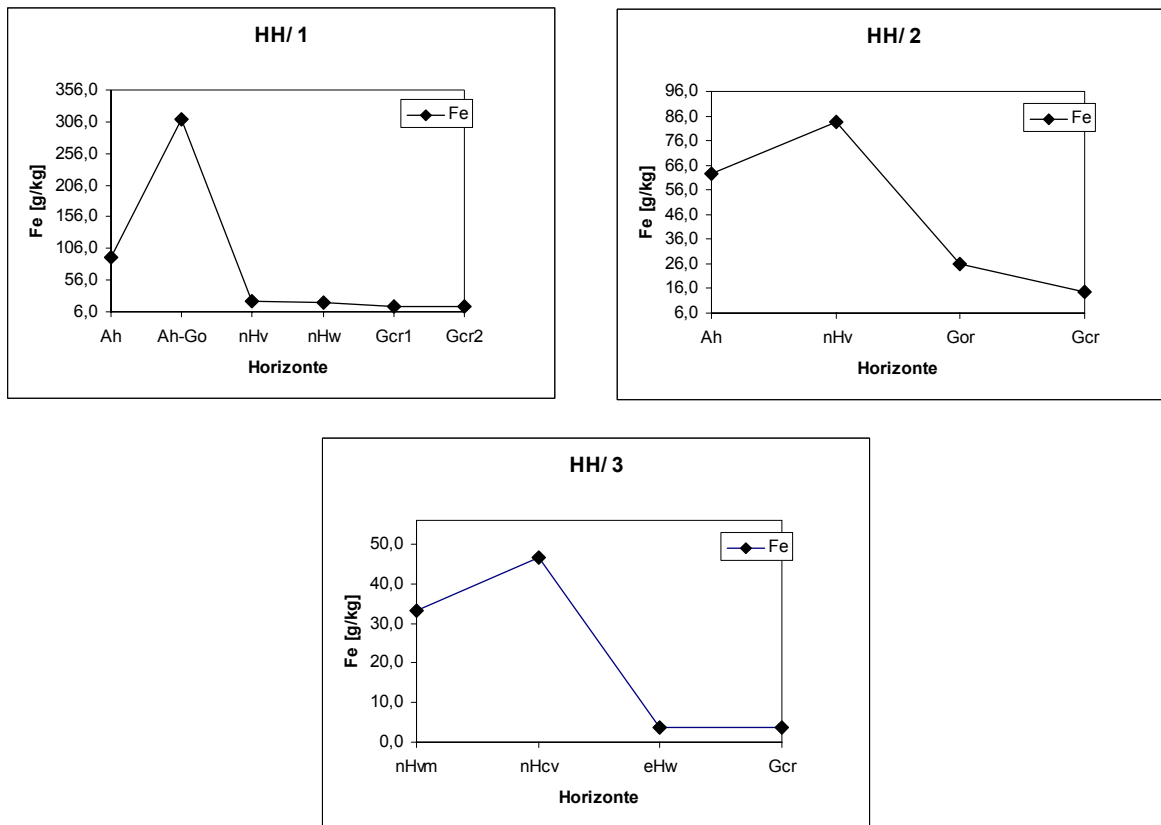


Abb. 5.7: Tiefenverteilung des Eisens in den Profilen. Die Werte sind in g/kg TS dargestellt bezogen auf die einzelnen Horizonte

Der Kurvenverlauf des Eisens ist ähnlich dem des Arsens (vgl. Abb. 5.5). Dagegen zeigt die Abbildung 5.8 die relativen Anteile des Eisens in den einzelnen Fraktionen. Die Anteile der 1. bis 2. Fraktion sind sehr gering und die Werte nehmen mit der Tiefe ab. Bei der Betrachtung der Eisenanteile (in % des summierten Gehaltes), in der EDTA- Fraktion ergibt sich für die einzelnen Horizonte ein relativ höherer Anteil an Eisen. In der gleichen Fraktion für Arsen ergibt sich ein geringerer Wert (Abb. 5.6). Dies deutet auf eine verminderte Stabilität der Oxide und zunehmende Bildung metallorganischer Komplexe hin (ZEIEN 1995). Diesen Trend bestätigen die ermittelten Mangan- Werte (siehe dazu Abb. 5.10).

Der Ah-Go-Horizont des Dipl. HH/1 Profils zeigt mit 17 Gew.-% die mit Abstand höchsten Fe-Gehalte, die zu 78 % erst im Königswasser erfasst wurden. Aufgrund der Bodenansprache muss auch dieser Königswasseranteil als oxidisches Fe interpretiert werden und hätte folglich in den Fraktion 5. bis 6. erfasst werden sollen. Die vorschriftsgemäß angesetzten Oxalatlösungen waren für diesen Horizont offensichtlich nicht konzentriert genug.

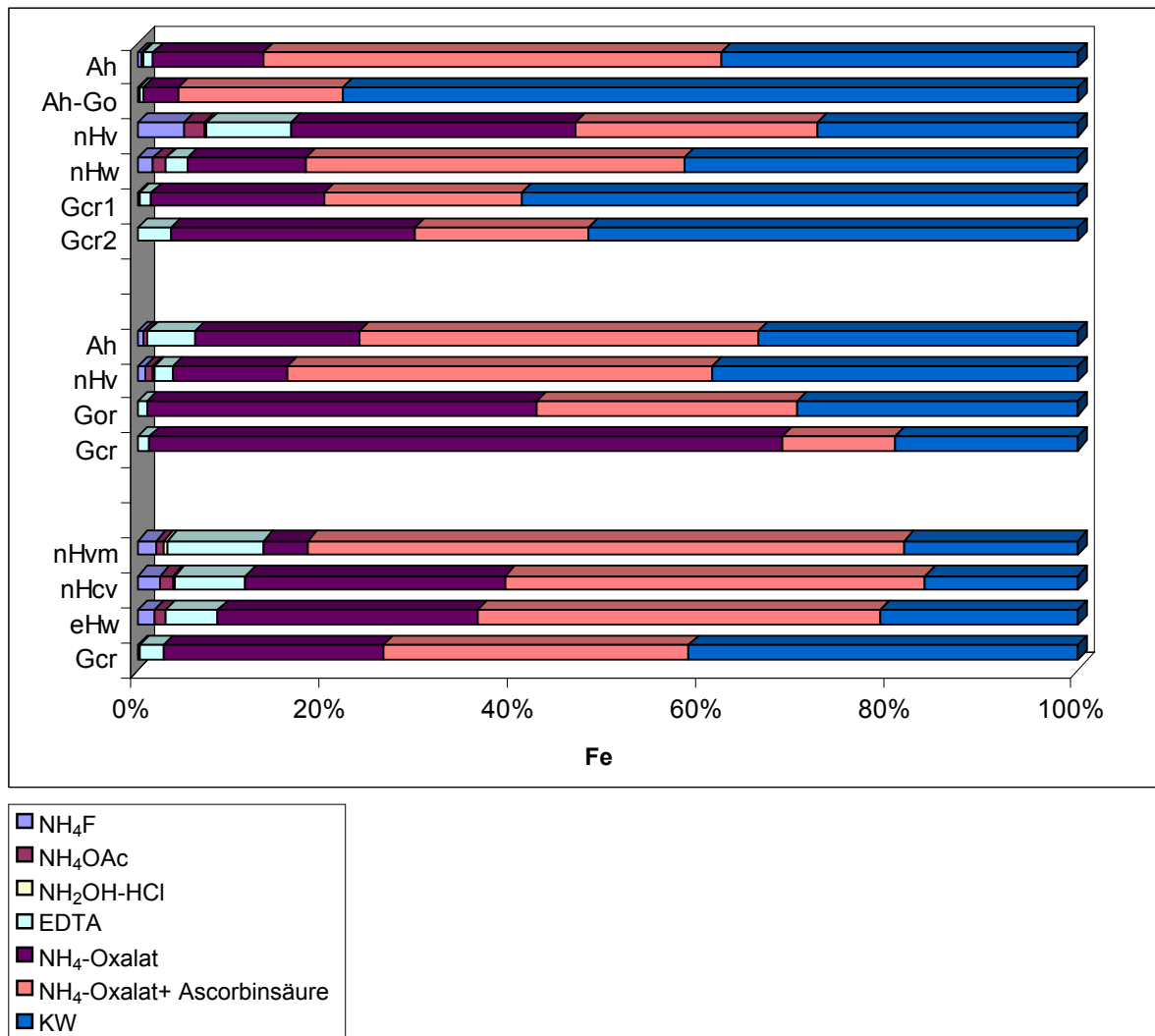


Abb. 5.8: Relative Eisengehalte der einzelnen Fraktionen. Die Werte sind auf die Gesamtgehalte der beprobten Horizonte bezogen. Die Profile sind von oben nach unten: HH/1, HH/2 und HH/3 dargestellt

Im Profil Dipl. HH/2 nehmen die extrahierten Eisenanteile der beiden Oxalat-Lösungen mit der Tiefe zu. Dabei liegen die höheren Anteile in schlecht kristallisierten Fe-Oxiden.

Für die vergleichsweise höhere organisch gebundenen Fe-Anteile im Profil HH/3 dürfte der schwach alkalische pH-Bereich, der vor allem bei den zeitweilig reduzierenden Bedingungen des Niedermoores vorliegt, verantwortlich sein (nach ZEIJEN 1995). Diese Voraussetzungen könnten zur erhöhten Bildung organischer Komplexe geführt haben (nach SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1998).

In Böden kommt Eisen, außer in silikatischen Bindungen, vorwiegend in amorphen und kristallinen Oxiden und Hydroxiden, sowie als metallischer Komplex vor. Um diese Gesamtgehalte an Eisen zu bestimmen wird in der Bodenkunde üblicherweise

Dithionit- Lösung (Fe_d) verwendet. In dieser Arbeit wurde Fe_d nicht bestimmt aber eine Untersuchung von FISCHER & FECHTER (1982) hat gezeigt, dass die Heiß-Oxalatextraktion (6. Fraktion) ähnliche Ergebnisse zu Fe_d bringt. Der Quotient aus Fe_0/Fe_d beschreibt den Aktivitätsgrad des Eisens der zwischen 0 und 1 besteht (CORNWELL & SCHWERTMANN 2003: 438). Es ist das Verhältnis des amorphen Eisenanteils zu den höher kristallinen Verbindungen und lässt eine Aussage über das Alter der Bodenentwicklung zu (SCHWERTMANN 1964).

5.3.3 Mangan

Manganoxide weisen, wie die Eisenoxide eine geringe Löslichkeit auf und können beide mikrobiell reduziert, gelöst und umverteilt werden. Da Mangan neben Mn(IV) und Mn(II) auch in dreiwertiger Form vorkommt, kann es zum Ladungsausgleich der Kationen kommen und auch Fe in seine Strukturform aufnehmen. Meist kommen die Mn-Oxide mit den Fe-Oxiden zusammen vor. Manganoxide sind leicht reduzierbar und schwer oxidierbar und dadurch mobiler in redoximorphen Milieu als die Fe-Oxide (nach SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1998).

Die in Abbildung 5.9 dargestellten Tiefenverteilungen des Mangans zeigen einen ähnlichen Verlauf wie die des Arsens und Eisens. Die höchsten Gehalte sind im Allgemeinen in den humosen Horizonten zu finden. Lediglich im Profil HH/2 bleibt der höchste Wert mit 1505 mg/kg TS im Gor- Horizont (Grundwasserschwankungsbereich) als auffällig festzuhalten. Dieser zeigt eine sekundäre Anreicherung an Mn-Oxiden. Die Mn-Gehalte nehmen mit der Tiefe hin ab, aber ein geringfügiger Anstieg der Werte in den Profilen HH/1 und HH/3 ist trotzdem zu beobachten, der sich als sekundäre Anreicherung zu interpretieren ist.

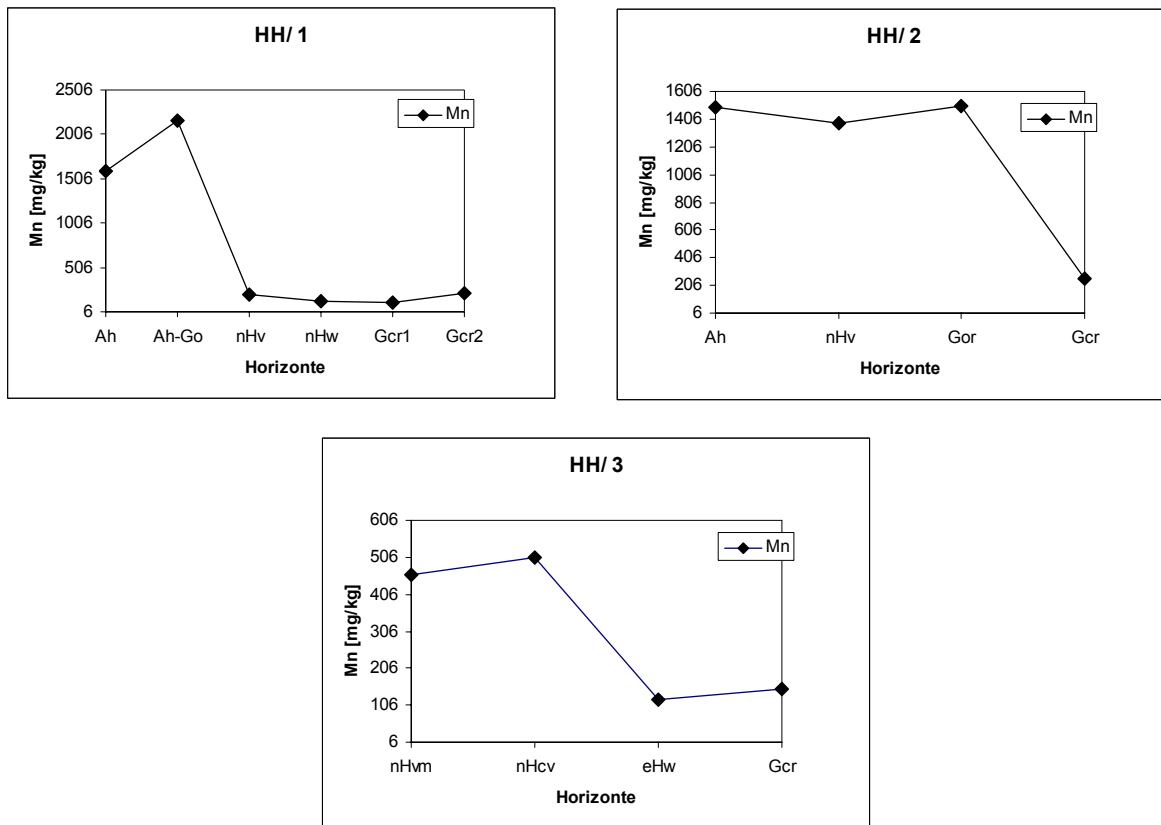


Abb. 5.9: Tiefenverteilung des Mangans in den einzelnen Profilen. Dargestellt sind die absoluten Werte als Summen der einzelnen Fraktionen

In der Abbildung 5.10 sind die relativen Anteile des Mangans in den einzelnen Fraktionen dargestellt. Die austauschbaren und karbonatisch gebundenen Fraktionen (1. u 2.) zeigen einen relativ geringen Prozentsatz des Gesamtgehaltes mit 0,1 - 3,6 % im Vergleich zur 3. und 4. Fraktion (30 – 38 %). Die Gehalte der 1. Fraktion nehmen konstant mit der Tiefe ab, die Werte der 2. Fraktion hingegen zeigen bis auf das Profil HH/3, keine erkennbare Kontinuität an.

Die ermittelten Mn-Anteile des Gesamtgehaltes zeigen eine hohe organische und, wie zu erwarten, eine hohe leicht reduzierbare Bindungsform der Manganoxide an. Aufgrund des vergleichbar niedrigeren Anteils von höchstens 26 % (Profil HH/2, Gcr-Horizont) in den beiden Oxalatextrakten (5. u. 6. Fraktion), kann eine deutliche Trennung der Mn-Oxide von den Eisenverbindungen vorgenommen werden.

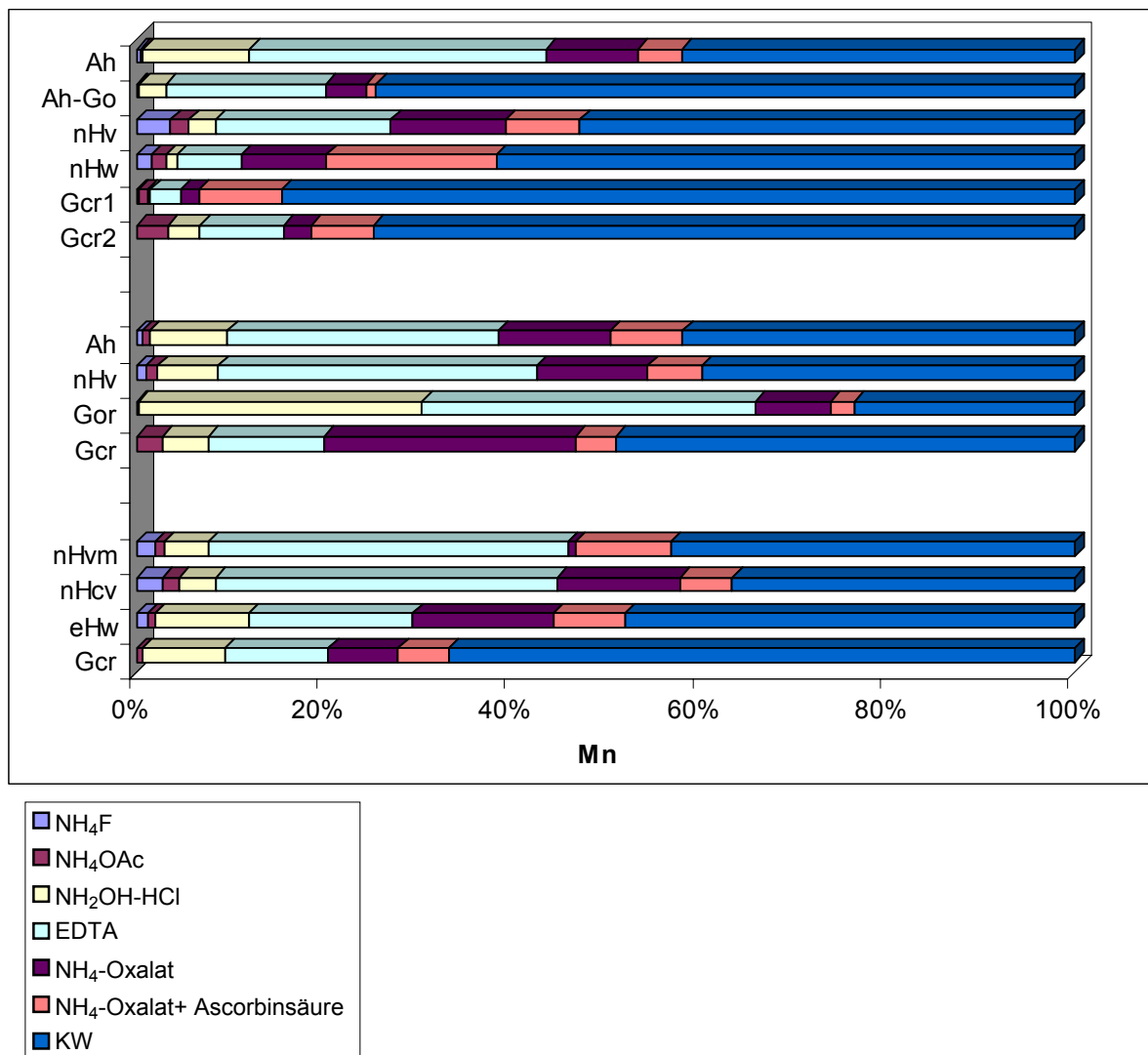


Abb. 5.10: Relative Mangananteile der einzelnen Fraktionen, bezogen auf die Horizonte der Bodenprofile. Die Profile sind von oben nach unten: HH/1, HH/2 und HH/3 dargestellt

Die in der Residualfraktion ermittelten hohen Anteile an Mn-Oxiden sind vermutlich auf den silikatisch gebundenen Anteil des Mangans zurückzuführen.

5.4 Korrelationen der Elemente

Bei den nachfolgenden Korrelationsberechnungen wird die lineare Korrelationsanalyse dargestellt und dabei die Stärke im Zusammenhang zweier Variablen ermittelt. Es wird der Gehalt eines Parameters im Boden bestimmt (X- Wert) und gegen den Gehalt von Arsen (Y- Wert) aufgetragen.

Die Korrelationsrechnung erfordert eine Normalverteilung. Diese kann bei < 50 Proben nicht überprüft werden. An dieser Stelle ist der Vermerk wichtig, dass die dargestellten

Ergebnisse der Korrelation nicht durch eine Clusterung oder durch einzelne Extremwerte verzerrt wurden.

In den vorherigen Kapiteln wurde diskutiert, dass das Arsen bestimmte Bindungsformen bevorzugt. In diesem Kapitel soll nun geprüft werden, wie eng diese Beziehungen sind und vor allem die Frage geklärt werden: Ob die As-Gehalte der Böden wirklich vom Eisen (5. bis 6. Fraktion) abhängig sind.

5.4.1 Arsen – Organischer Kohlenstoff

Die ermittelten hohen Arsengehalte (As_{ges}), wie sie in der Abbildung 5.5 dargestellt sind, kommen ausschließlich in den humosen Horizonten der Profile vor. Aus diesem Grund war es angebracht eine Korrelationsanalyse, die den Einfluss des Humus auf die As-Gehalte darstellt, durchzuführen. Die Abbildung 5.11 zeigt die As-Gehalte der EDTA- Fraktion in Abhängigkeit von den organischen Kohlenstoffgehalten (C_{org}).

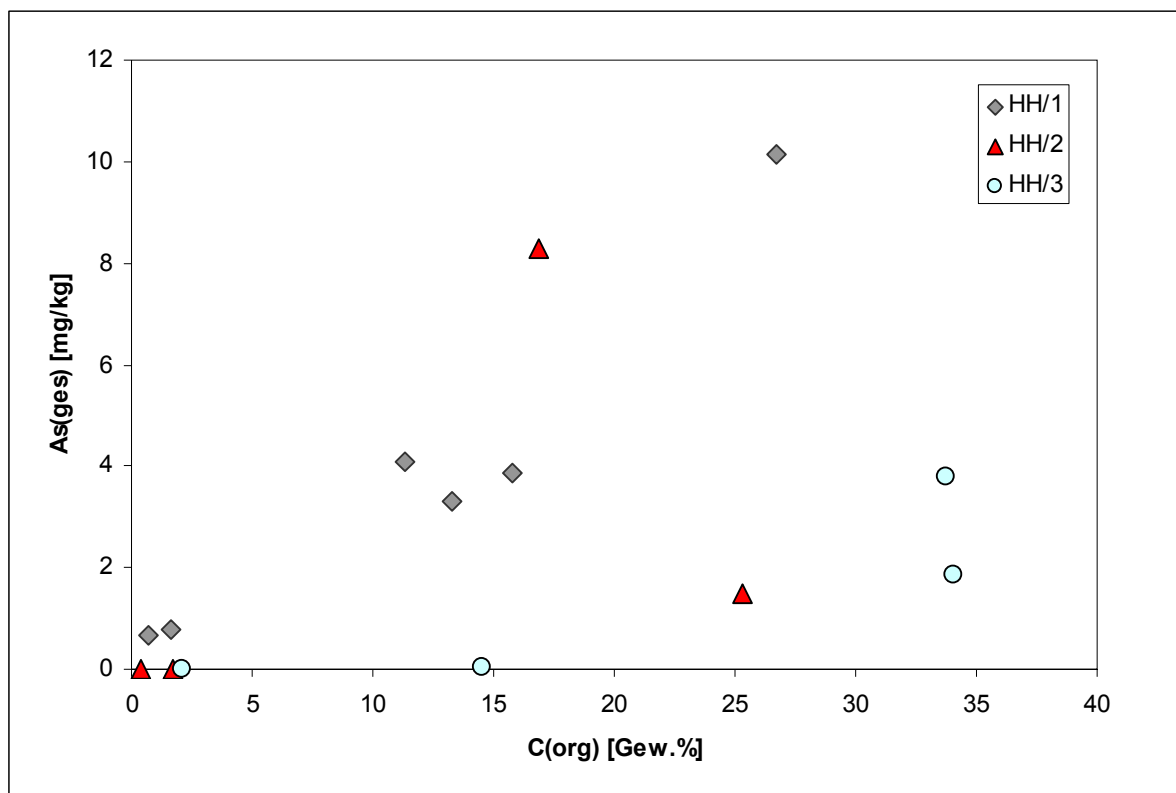


Abb. 5.11: Korrelationsdiagramm Arsen - Humusgehalt bezogen auf die Profile. Dargestellt sind die As-Gehalte in der EDTA- Fraktion und die Gesamtgehalte der C_{org}

Das Korrelationsdiagramm verdeutlicht, dass sich zwischen den Humus- und Arsengehalten keine lineare Korrelation einstellt. Eine gewisse Linearität weist das

Profil HH/ 1, mit einem Korrelationskoeffizient $R^2=0,916$ zwar auf, diese sollte aber nicht überbewertet werden, da sie mit der Bodenansprache erklärt werden kann. Eine Korrelation zwischen den As-Gesamtgehalten und C_{org} (siehe Abbildung 5.12) mit $R^2=0,45$ zeigt ebenso keine direkte Beziehung zwischen den beiden Parametern.

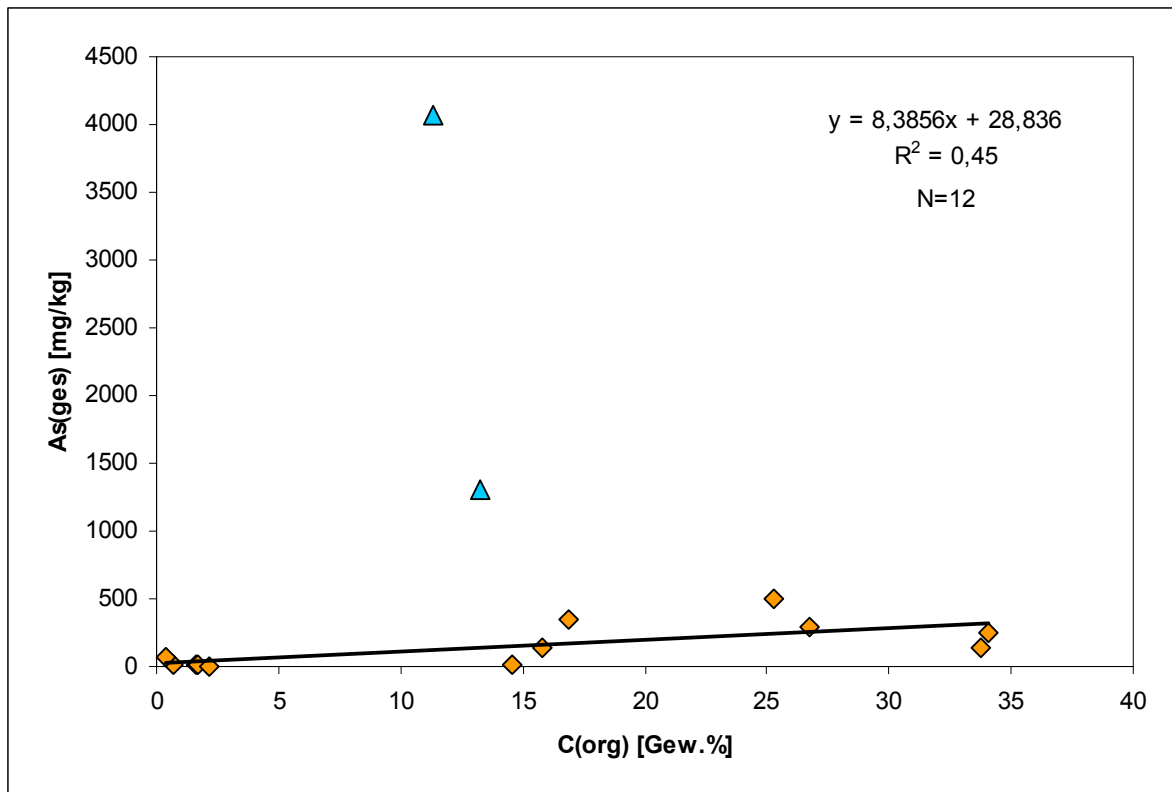


Abb. 5.12: Korrelation zwischen As-Gesamtgehalte und organischem Kohlenstoff. Dargestellt sind die absoluten Werte von As in mg/kg und die von C_{org} in Gew.-%. Die blau markierten Dreiecke nehmen an der Korrelation nicht teil

Die absoluten Konzentrationen, der As-, und organischen Kohlenstoffgehalte, in diesem Profil zeigen, wie in Abbildung 5.13 dargestellt, auch den Tiefenverlauf der beiden Parameter. Erkennbar ist, dass die stark humosen nHv-, und nHw-Horizonte des Profils HH/1 im Vergleich mit den Ah-, und Ah-Go-Horizonten niedrige As-Konzentrationen aufweisen. Im Profil HH/2 weist der relativ hohe As-Gehalt des Ah-Horizontes niedrigere Humusgehalte auf, dies ist, ähnlich wie im Profil HH/3, wo in noch humosen eHw-Horizont bereits der As-Gehalt gering ausfällt, ein Indiz für die nicht bestehende Beziehung zwischen As- und Humusgehalten.

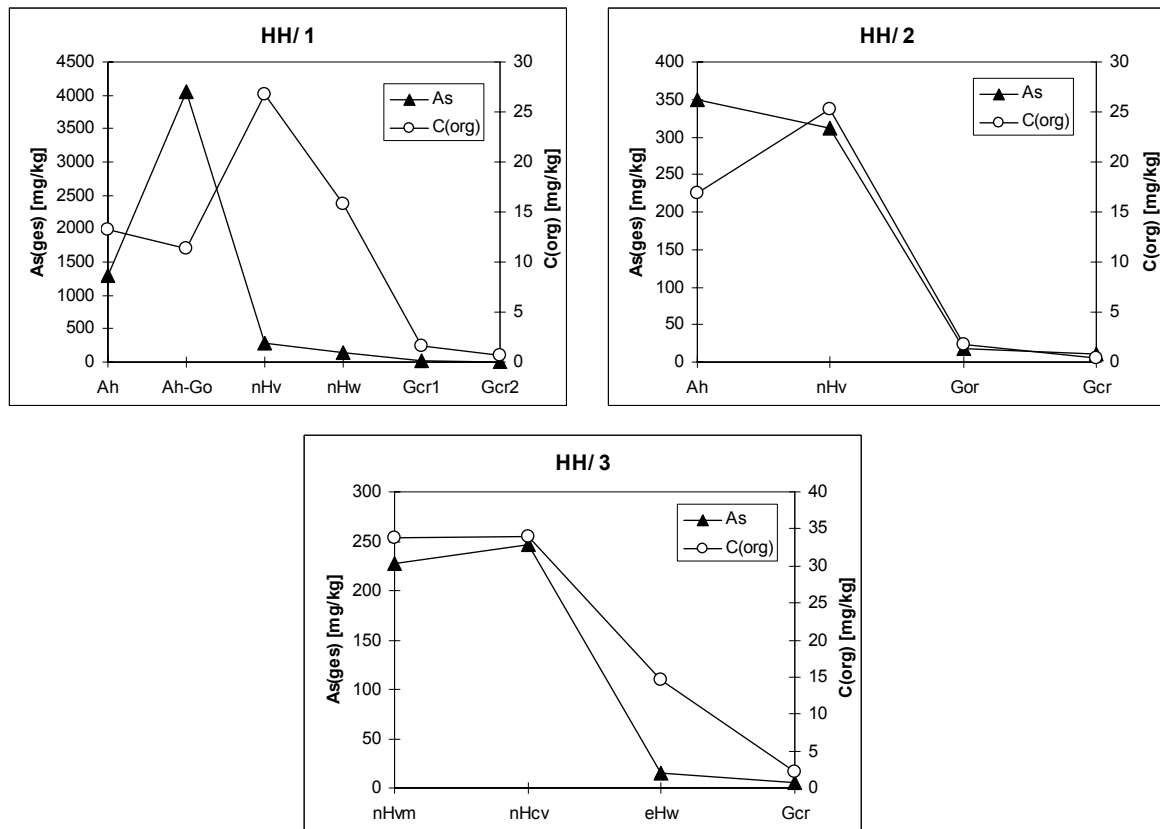


Abb. 5.13: Absolute Gehalte der As-, und C_{org} - Konzentrationen in den einzelnen Profilen

Ein direkter Zusammenhang zwischen Arsen und organischem Kohlenstoff bestätigte sich nicht, weil Arsen keine Abhängigkeiten zeigt, die den organisch gebundenen Kohlenstoffen der Böden zuzuordnen ist.

5.4.2 Arsen – Eisen

Die Profile zeigen neben den hohen Arsen- auch hohe Eisengesamtgehalte. In Abbildung 5.14 sind die absoluten Werte des Arsens und des Eisens zum Vergleich dargestellt. Der Tiefenverlauf beider Elemente ist fast parallel. Die höchsten Konzentrationen, sowohl von Arsen (4063 mg/kg), als auch von Eisen (30,9 %), wurden in dem Ah-Go-Horizont im Profil HH/1 ermittelt. Hiermit wurden die von BRUNNACKER (1959) beschriebene Ockerausfällungen mit hohen Eisenoxid- Anteilen bestätigt.

Im reduzierenden Milieu des Unterbodens sind die As-, und Fe-Konzentrationen entsprechend niedrig.

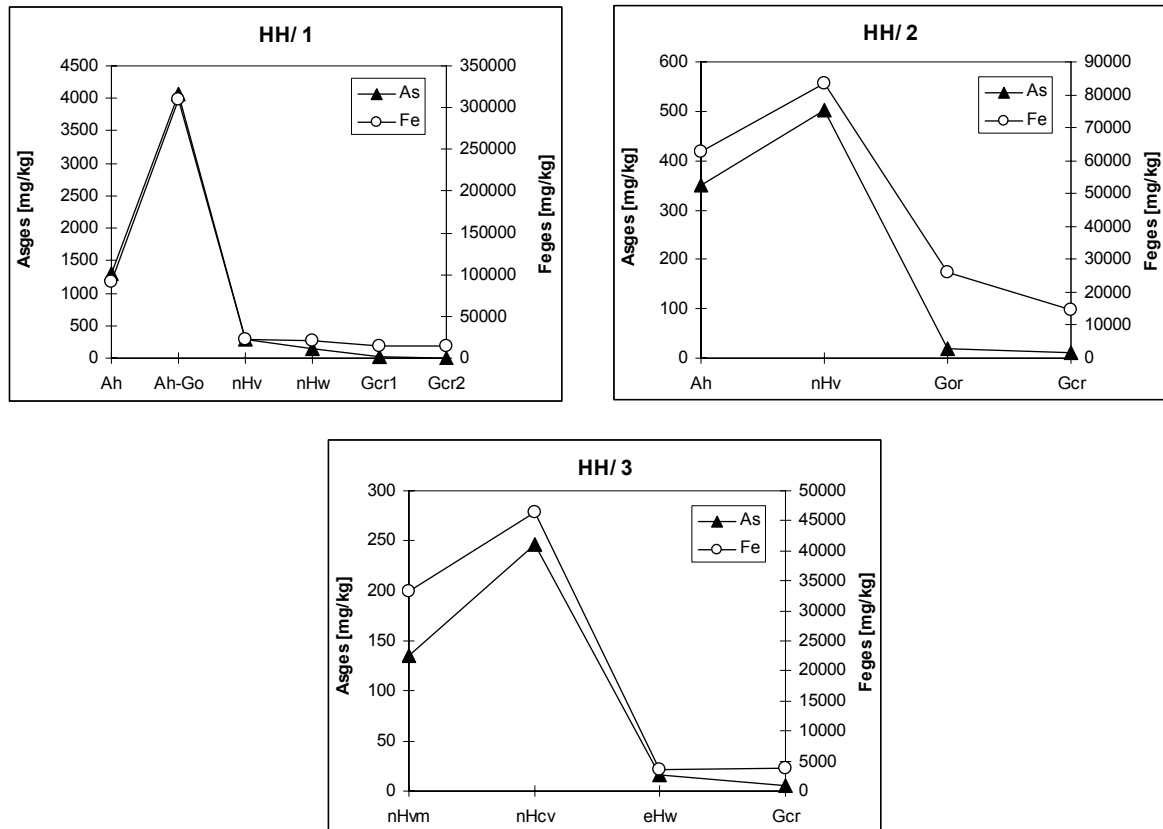


Abb. 5.14: Absolute As- und Fe-Konzentrationen in den Profilen. Die Daten sind in mg/kg dargestellt

In der Korrelationsanalyse werden zuerst die Gesamtgehalte des Arsens mit denen des Eisens dargestellt (Abb. 5.15). In der Grafik wurden die Profile durch verschiedene Symbole gekennzeichnet. Die einzelnen Profile weisen Werte mit einer ausgeprägten Linearität auf. Zur besseren Darstellung wurden innerhalb der Korrelationsanalyse (Abbildung 5.16) die Ausreißer ausgenommen bzw. markiert. Das Bestimmtheitsmaß weist mit dem ermittelten Wert $R^2=0,93$ auf eine enge Beziehung zwischen den beiden Größen hin.

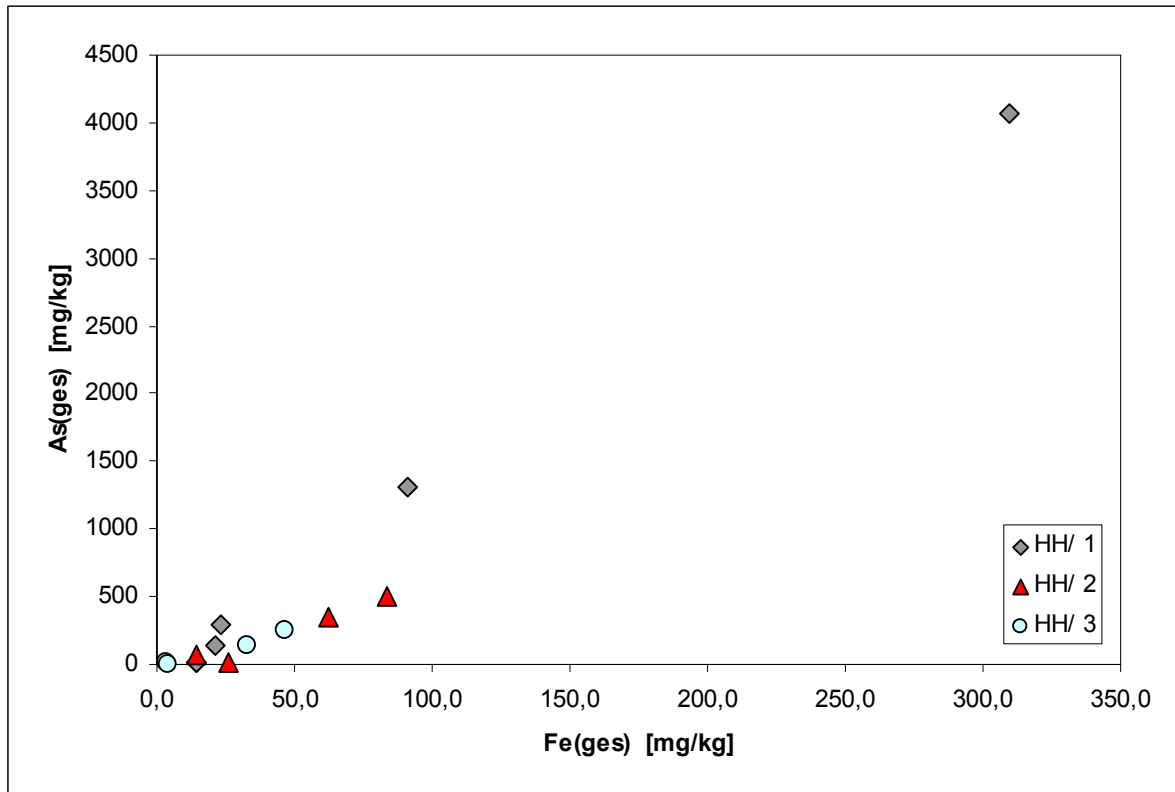


Abb. 5.15: Korrelation zwischen Arsen- Eisen. Dargestellt sind die Gesamtgehalte der Elemente (Summe der einzelnen Fraktionen, in mg/kg) und die Profile sind einzeln gekennzeichnet

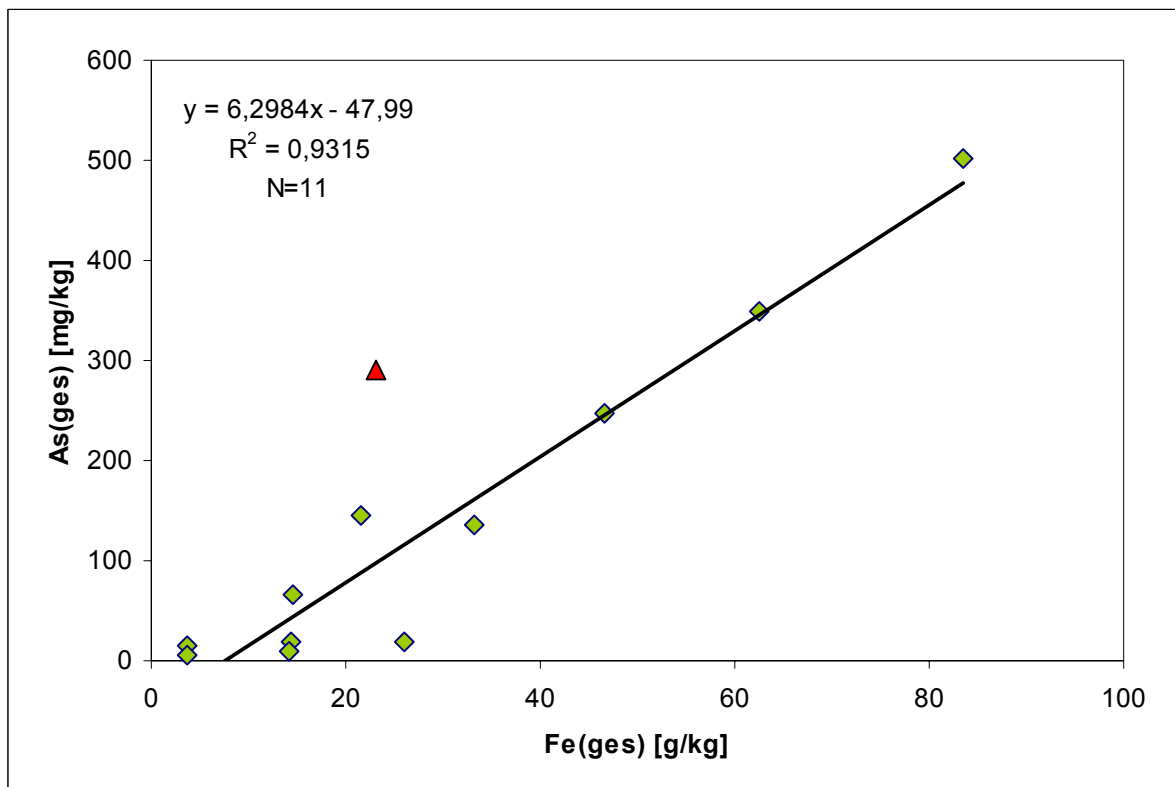


Abb. 5.16: Korrelationsanalyse zwischen Arsen und Eisen. Dargestellt sind die absoluten Werte der Gesamtgehalte. Das rot markierte Dreieck nimmt an der Korrelation nicht teil.

Die As-Verbindungen werden an den Fe-Oxiden adsorbiert und können sich in den Boden-Horizonten anreichern. Um diese Aussage zu unterstützen, wurden die ermittelten Werte zur Oxalat-Extraktion addiert und als Korrelationsanalyse mit den Arsengehalten aus der 5. und 6. Fraktion in der Abbildung 5.17 dargestellt.

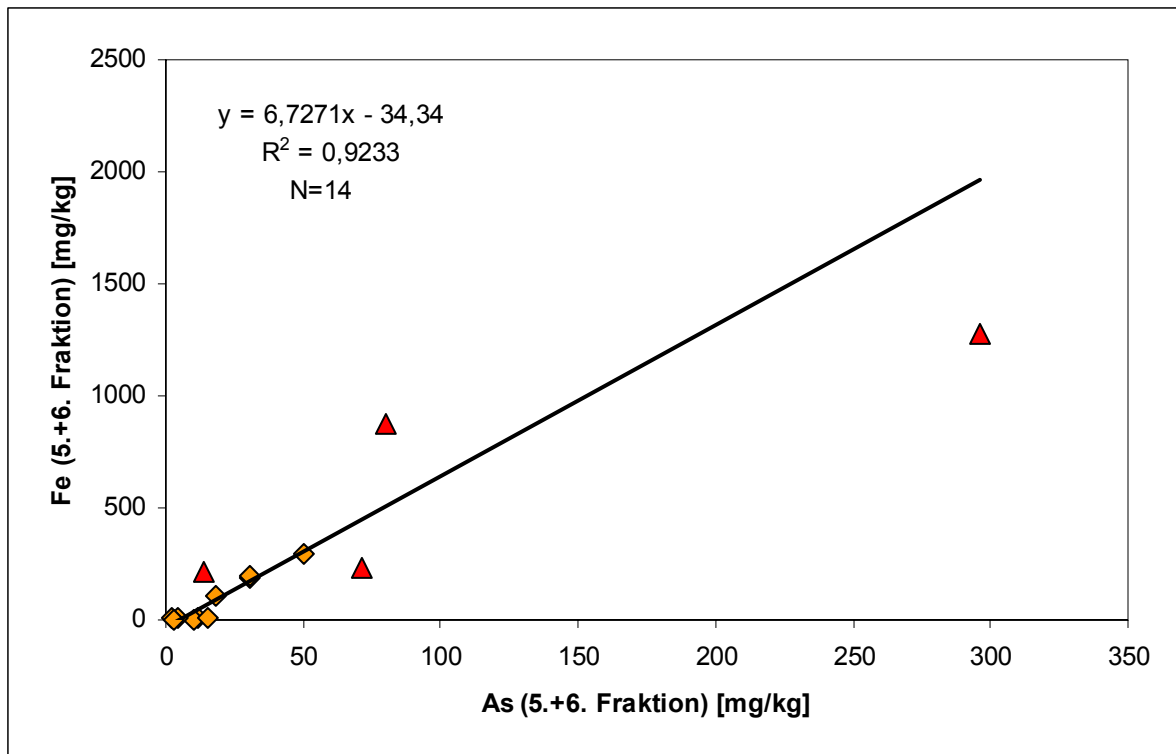


Abb. 5.17: Korrelationsanalyse der pedogenen Fe- Anteile und Arsengehalte in der 5. und 6. Fraktion. Die rot markierten Ausreißer nehmen an der Analyse nicht Teil.

Das Bestimmtheitsmaß ergab mit dem Wert $R^2=0,92$ eine lineare Korrelation und bestätigt, dass das Arsen mit den Eisenoxiden vergesellschaftet auftritt.

5.4.3 Arsen – Mangan

Die relativ hohen Anteile der Absolutgehalte des Arsens und Mangans (Abbildung 5.18) zeigen einen ähnlichen Verlauf im Tiefenprofil. Eine Ausnahme bildet das Profil HH/2. Im Gor-Horizont liegt eine hohe Konzentration, vermutlich sekundär angereicherter, Mn-Oxide vor.

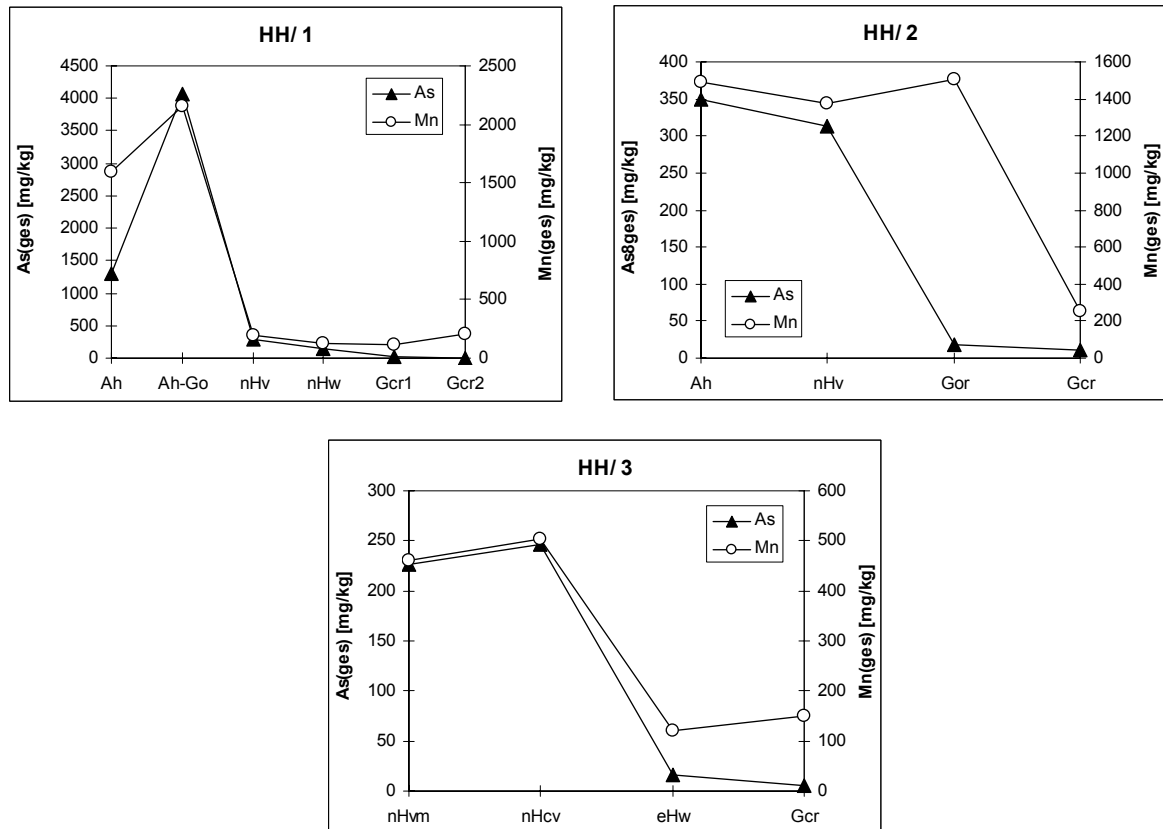


Abb. 5.18: Arsen- und Manganverteilung in den Profilen. Dargestellt sind die Gesamtgehalte in mg/kg

Ein möglicher Zusammenhang zwischen Arsen und Mangan ließ sich aus der Korrelationsanalyse (Abbildung 5.19) nicht ableiten. Da die EDTA- Fraktion höhere Anteile an organisch gebundenen Mn-Oxiden vermuten ließ, wurde eine Korrelation von Mn und C_{org} versucht. Die Bestimmtheitsmaß mit $R^2=0,40$ zeigt aber keinen bestehenden Zusammenhang.

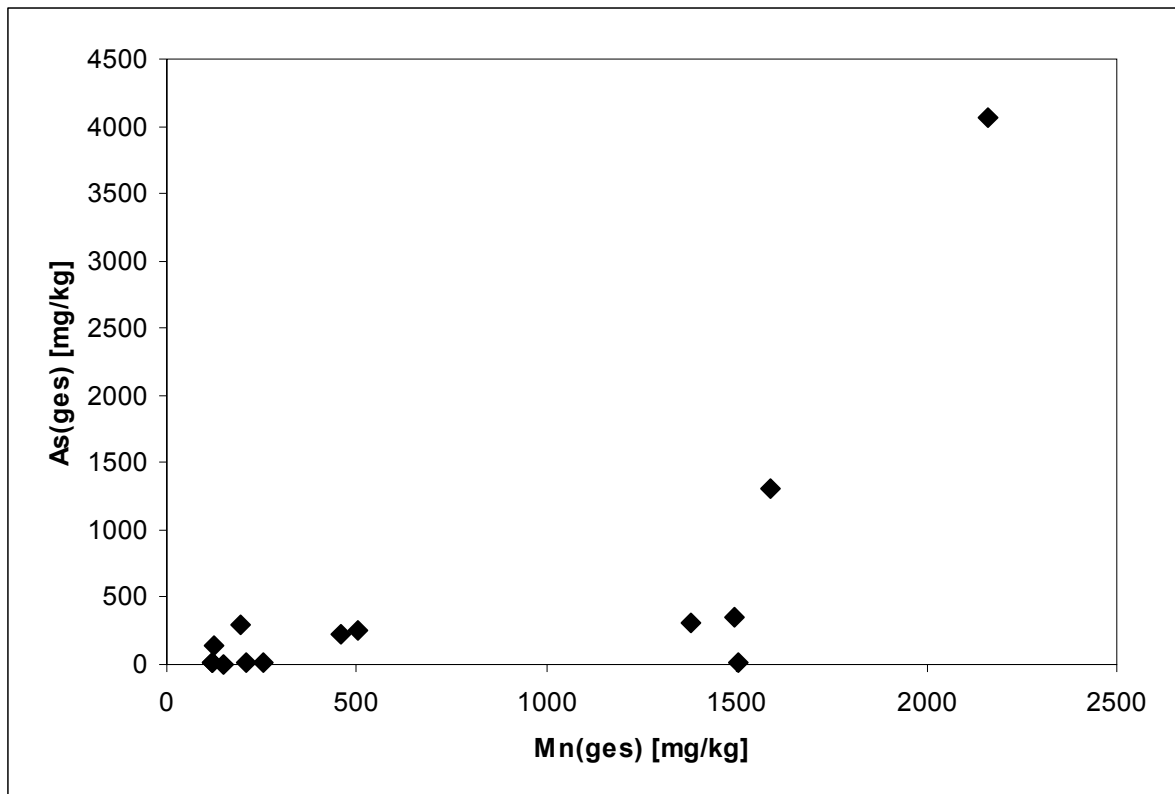


Abb. 5.19: Korrelation zwischen Arsen und Mangan. Dargestellt sind die Gesamtgehalte beiden Elementen als Summe der einzelnen Fraktionen.

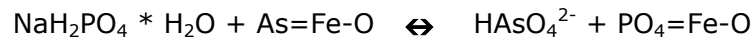
5.5 Phosphataustauschbares Arsen

Um die Mobilisierbarkeit des Arsens zu erfassen wurde ein spezifischer Austausch mit Phosphat durchgeführt. Das Prinzip des Versuchs beruht auf der Bestimmung der Kationen- bzw. Anionenaustauschkapazität.

Austauschbar gebundene Ionen können auf verschiedene Weise fixiert werden, nämlich in Fällungsprodukten (Reaktion mit Fe-Ionen), als hydroxo- oder Metallorganischer Komplex, durch kovalente Bindungen und im inneren der Minerale (z.B. Tonminerale). Das Fixierungsvermögen ist keine feste Größe, es ändert sich in Abhängigkeit von den Standortbedingungen (nach SCHLICHTING et. al. 1995).

Bei der Durchführung des zweiteiligen Versuches wurden jeweils die Phosphat- und Arsenwerte bestimmt. Es sollten Informationen gesammelt werden, die eine Aussage darüber zuließen, ob und in welcher Menge Arsen (bzw. Arsenat) im Boden spezifisch austauschbar ist.

Zunächst wurde eine Phosphat-Lösung zu den Bodenproben gegeben, bei der die folgende Reaktion zu erwarten war:



Auffallend waren die geringen Arsenatgehalte von 0,006 – 3,33 mmol/kg TS, die aus der Feststoffphase der Böden durch Phosphat ausgetauscht wurden. Diese niedrigen Werte zeigen, dass die Elution im ersten Schritt nur das oberflächengebundenen Arsen durch Phosphat ersetzte, während die stärker gebundenen As-Anteile weiter im Feststoff verblieben (nach TRETNER 2002).

Im zweiten Schritt erfolgte ein Arsen-Rücktausch. Die hier gemessene Phosphat-Werte (Abb. 5.20) zeigen überwiegend eine Übereinstimmung mit denen des ersten Schrittes.

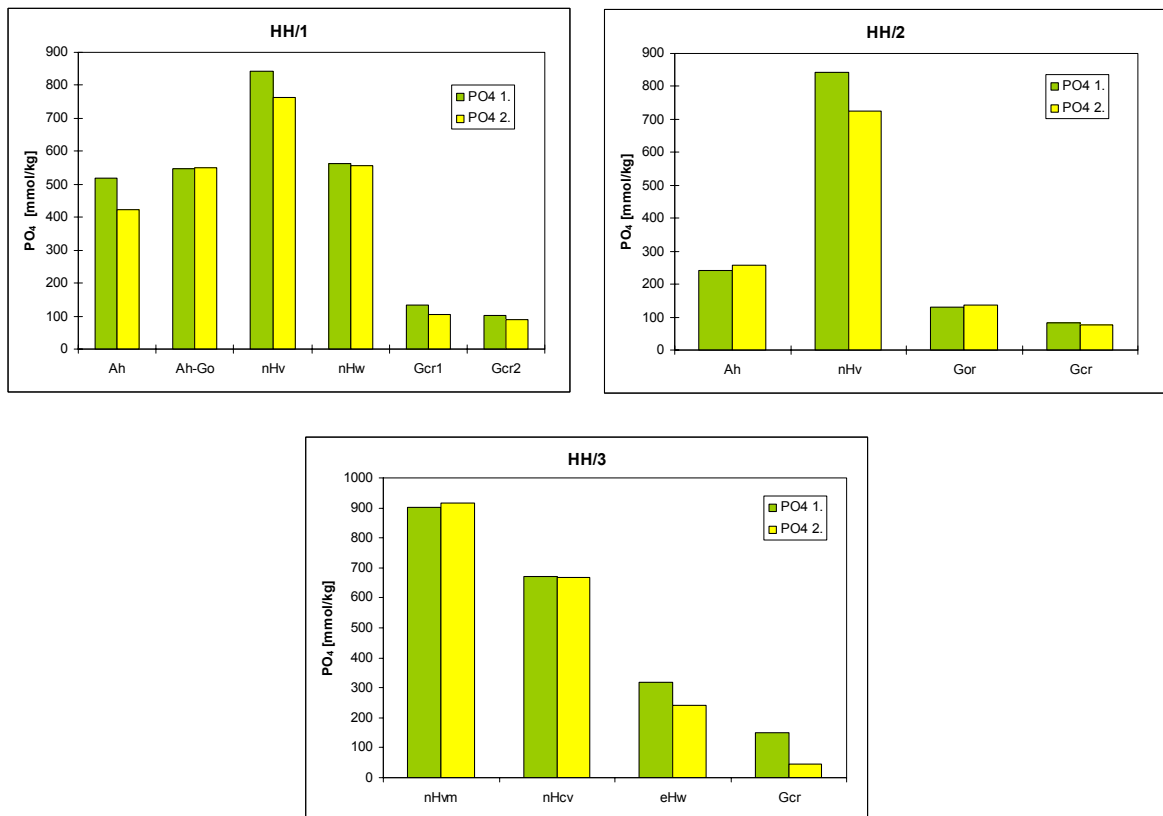


Abb. 5.20: Phosphatwerte des Austausch- Versuches in mmol/kg TS. PO₄ 1. stellt die Ergebnisse der eingetauschten Menge Phosphat im ersten Schritt, PO₄ 2. die aus dem zweiten Schritt des Versuches dar.

Die meisten eingetauschten Phosphate konnten wieder aus den Bodenproben zurückgewonnen werden. Die geringfügig niedrigeren Werte des Phosphates aus dem

zweiten Schritt geben den Hinweis, dass ein Restteil der Phosphate aus der im ersten Schritt zugeführten Gesamtmenge, wohl in sorbierter Form im Boden verblieben ist.

Interessant ist die Betrachtung der in Abbildung 5.21 dargestellten Arsenat-Rücktauschreaktionen im Vergleich zu den Phosphatwerten des ersten Schrittes. Die erwarteten, hohen Arsenat-Gehalte (Ah-Go-Horizont des Profils HH/1) konnten nicht gemessen werden.

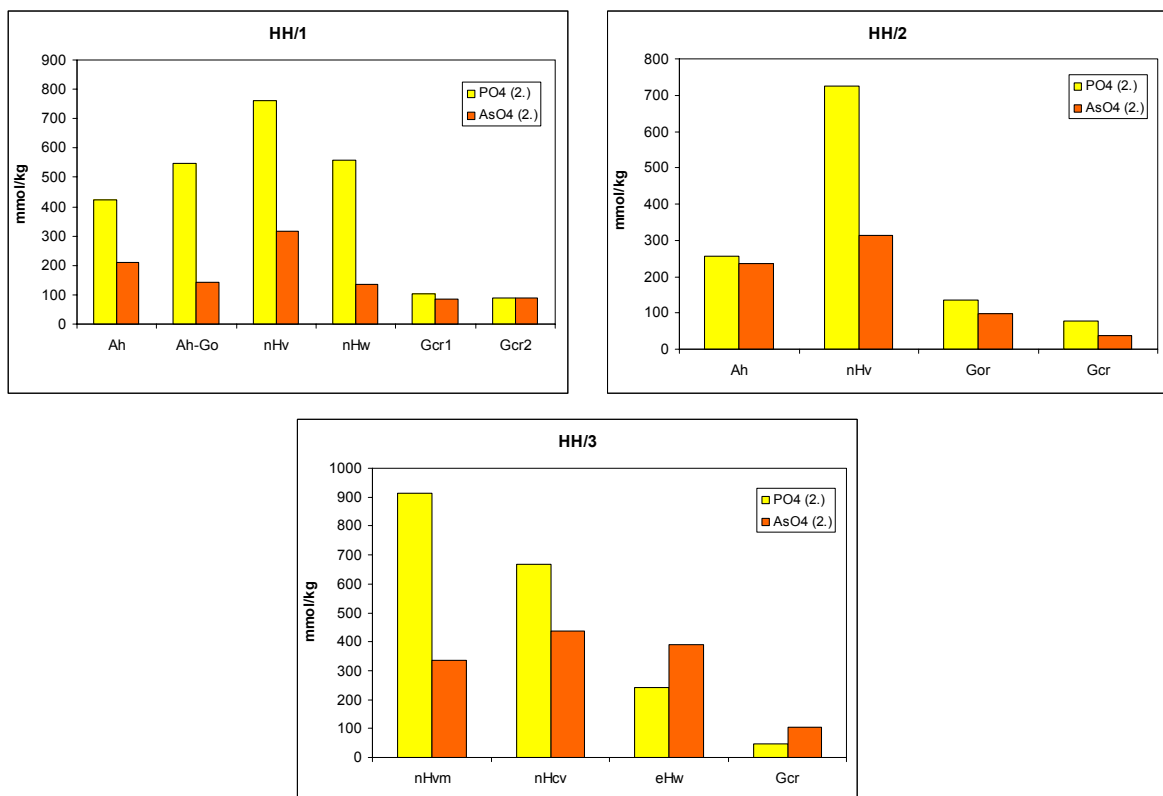


Abb. 5.21: Vergleich der Rücktauschwerte des Phosphats und Arsenats im zweiten Schritt. Die Werte sind in mmol/kg dargestellt

Dies spricht für eine starke Bindung des Arsens an die Fe-Oxide. Das zeigte auch die sequentielle Extraktion. Allgemein wurden niedrigere Arsenat-Gehalte im Vergleich zu den Phosphat-Gehalten festgestellt. Ausnahme bilden die mineralischen Horizonte (eHw und Gcr) des Profils HH/3, mit ihren deutlich höheren AsO_4 -Werten. Im Prinzip kann mehr Phosphat aus dem Boden freigesetzt werden als AsO_4 gebunden ist. Das Phosphat kann auch aus der Rücklösung von Fällungen (z.B. Ca-Phosphat) stammen.

Die durchgeführten Versuche beweisen, dass Arsen bezogen auf den spezifischen Austausch, in oberflächengebundener Form, nur geringfügig mobil ist. Dagegen kann

der Boden zusätzlich Arsen, im Fall eines Überschusses, aufnehmen und an Feststoffe binden.

5.6 Ökologische Bedeutung

Für die Beurteilung der Arsenbelastung in Böden gibt die Bundes- Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) Anhaltspunkte. Für Arsen gelten demzufolge beim Boden - Mensch Belastungspfad die in der Tabelle 5.1 dargestellten Prüf- und Maßnahmenwerte.

Tab. 5.1: Prüf- und Maßnahmenwerte für den Schadstoffübergang Boden – Mensch (nach BBodSchV 1999)

Prüf- und Maßnahmenwerte für Arsen [mg/kg TS]			
<i>Kinderspielflächen</i>	<i>Wohngebiete</i>	<i>Park- und Freizeitanlagen</i>	<i>Industrie- und Gewerbegrundstücke</i>
25	50	125	140
Unter Annahme von 30% Resorptionverfügbarkeiten angepassten Prüfwerte in mg/kg TS			
85	170	425	500

Die dargestellten Werte wurden mit dem Königswasseraufschluss ermittelt. Für den Schadstoffübergang Boden - Nutzpflanze für Arsen gelten die in der Tabelle 5.2 zusammengefassten Werte.

Tab. 5.2: Prüf- und Maßnahmenwerte für Arsen bei Schadstoffübergang Boden – Pflanze (nach BBodSchV 1999). Extraktionsverfahren: KW- Königswasser, AN- Ammoniumnitrat.

Prüf- und Maßnahmenwerte für Arsen [mg/kg TS]			
<i>Nutzung</i>	<i>Prüf-/ Maßnahmenwert</i>	<i>mg/kg</i>	<i>Schadstoffübergang Boden - Nutzpflanze</i>
<i>Ackerbau, Nutzgarten</i>	Prüfwert	200 (KW)	Im Hinblick auf Pflanzenqualität
	Prüfwert bei teilw. Reduzierenden Bedingungen	50 (KW)	
	Maßnahmenwert	50 (KW)	
<i>Grünland</i>			
<i>Ackerbau, Nutzgarten</i>	Prüfwert	0,4 (AN)	Im Hinblick auf Wachstumsbeeinträchtigungen bei Kulturpflanzen

Arsen ist nur in sauerstofffreien bis sauerstoffarmen Gewässern löslich. Da in quartären Fließgewässern ausreichende Mengen an Sauerstoff vorhanden sind, besteht keine Gefahr, dass sich in diesen Gewässern hohe Arsenkonzentrationen anreichern (BBodSchV 1999).

Die im Arbeitsgebiet ermittelten Arsenkonzentrationen übersteigen die Richtwerte (der BBodSchV 1999), insbesondere im Profil HH/1, welches dem HotSpot-Bereich zugeordnet ist, teilweise um ein Vielfaches. Die ermittelten As-Gehalte in der Ammonium-Nitrat-Lösung sind sehr gering mit 0,001 - 0,011 mg/kg TS und überschreiten somit die in der BBodSchV festgelegte Prüf- und Maßnahmenwerte für Ammonium-Nitrat nicht (vgl. Tab. 5.2 und Anhang 2.11).

Für diese Arbeit wurden keine Sickerwasserproben entnommen. Die BBodSchV gibt einen Prüfwert für den Wirkungspfad Boden - Grundwasser von 10 µg/l für As an, dieser Wert wird in der angeführten S4-Analyse in dem Feststoff Lösungsverhältnis 1:10 in den oberen Bodenhorizonten des Profils HH/1 teilweise mehrfach überschritten (µg/l-Werte), nimmt aber mit der Tiefe ab. Die weiteren Bodenprofile zeigen keine Überschreitung dieser Prüfwerte.

5.7 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die in den vorherigen Kapiteln beschriebenen und analysierten Untersuchungen zeigen erhöhte Arsen- und Eisenkonzentrationen in den Tiefenprofilen der untersuchten Böden. Anhand dieser Untersuchungen konnte geklärt werden, in welcher Bindungsform das Arsen vorwiegend auftritt. Die Korrelationsanalyse zeigt eine enge Beziehung zwischen Fe und As an. Diese Beziehung konnte zu Humusgehalten und Mn-Oxiden nicht oder kaum befriedigend hergestellt werden. Demzufolge liegt das Arsen vorwiegend an pedogenen Fe-Oxiden/Hydroxiden in adsorbierter Form vor und bestätigt die Annahme, dass das Arsen geogener Herkunft ist.

In ihrer Arbeit *The Arsenic Distribution in Finnish Peat Bogs* kommen P. Minkinen und I. Yliruokanen (1978) zu einer ähnlichen Aussage. Die Arsenwerte in trockenem Torf (340 ppm) waren wesentlich geringer als in Torfasche (4800 ppm). Hierfür geben sie die mineralische Bindung als Ursache an. Korrelationen ergaben, dass das finnische Arsen sich vorwiegend an Nickel bindet. Ebenfalls eine spezifisch metallische Bindung. Die weitere Parallele ist in der geogenen Herkunft des Arsens und Entwicklungsgeschichte die zur Anreicherung führte zu sehen. Nämlich die Annahme, dass das Arsen direkt unter dem Moor oder stromaufwärts über glaziale Ströme aus

dem arsenhaltigen Grundgebirge angereichert wurde. Also eigentlich zufällig, wie im Erdinger Moos, entsprechend der geologischen und morphologischen Gegebenheiten.

Für die bessere Charakterisierung des Humuskörpers wäre eine Humusfraktionierung wünschenswert gewesen. Diese weitere Untersuchung hätte eine Antwort auf die möglichen metallorganischen Komplexbildungen geben können, um festzustellen, an welchen Bestandteilen der Huminstoffe Arsen adsorbiert vorliegt.

Die pedogenen Fe-Anteile wurden in der 5. und 6. Fraktion ermittelt (vgl. Kapitel 5.3.2). Die im Horizont Ah-Go des Profils HH/1 ermittelten höchsten Fe-Gehalte wären eventuell mit Dithionit-Lösung quantitativ besser erfasst worden.

Die Untersuchungen zeigen ferner, dass Arsen unter reduzierenden Verhältnissen mobilisiert werden kann und dadurch die As-Konzentration im Bodenwasser erheblich erhöht wird. Reduzierende Bedingungen können unter anderem dann entstehen, wenn die organischen Substrate des Bodens, z.B. durch überschichten mit Wasser, vom Sauerstoff abgetrennt werden. Aus diesem Grund könnten großflächige Versiegelungen oder Renaturalisierungen dieser Gebiete zur vermehrten Freisetzung des Arsens aus dem Boden führen.

ZUSAMMENFASSUNG

Die vorliegende Diplomarbeit wurde an der Fakultät für Geo- und Umwelt-Wissenschaften der Ludwig Maximilians Universität München erstellt.

Die erhöhten Arsenkonzentrationen im Erdinger Moos, die bereits in den Jahren 2002 und 2003 vom Geologischen Landesamt flächenhaft aufgenommen wurden, können mit dieser Arbeit um drei Tiefenaufnahmen ergänzt werden. Die Proben, die innerhalb der, aus quartären Schottern und feinkörnigen Sedimenten hervorgegangen Böden und Moorflächen, entlang von Profilen genommen wurden, erfassen auch den Grundwasserschwankungsbereich. Anhand der mit den Proben durchgeführten Versuche und den Geländeaufnahmen selbst, konnten Aussagen zur Tiefenverteilung, Bindungsformen und Mobilisierbarkeit des Arsens getroffen werden.

Aus den Bodenprofilen entnommene Proben wurden verschiedenen bodenchemische Analysen unterzogen. Über die ermittelten organischen Kohlenstoffgehalte konnten die Bodenformen innerhalb der Profile bezeichnet werden. So wurden Anmoore bzw. Niedermoore unterschieden. Die Torfhorizonte weisen Gehalte von organischem Kohlenstoff um 15 – 34 % auf, die mineralischen Horizonte nur wenige Prozent, um 0,7 – 2,1 %.

Die Gesamtgehalte der Elemente As, Fe und Mn wurden Anhand sequentieller Extraktionen nach ZEIEN & BRÜMMER (1989), verändert nach RÜDE (1996) ermittelt. Die Tiefenverteilung des Arsens zeigt eine, zur Tiefe hin, kontinuierlich abnehmende Kurve. Der höchste As-Gehalt, mit 4063 mg/kg TS, wurde im Ah-Go-Horizont des Profils HH/1 gemessen. Dieser Horizont stellt eine Ockerlinse dar, mit sehr hohen Fe-Gehalten (30,9 %) und Mn-Gehalten (2160 mg/kg TS). Die Tiefenverteilung des Eisens verläuft ähnlich wie die des Arsens. Dagegen steigen die Werte der Mn-Oxide geringfügig im Grundwasserschwankungsbereich der unteren Horizonte.

Die relativen Anteile der einzelnen Fraktionen geben ein detailliertes Bild über die Bindungsformen des Arsens in den Böden. Danach wird das Arsen vorwiegend an pedogenen Eisenoxiden/Hydroxiden (bis zu 75,8 %) in adsorbierter Form gebunden. Die vergleichsweise geringen, aber mit der Tiefe zunehmenden Anteile des Arsens, in der leicht austauschbaren Fraktion, setzten eine erhöhte Mobilität im Grundwasserschwankungsbereich voraus.

Der höchste Fe-Anteil (78 %) wurde im Ah-Go-Horizont des Profils HH/1 über die Residualfraktion gemessen. Dieser Wert sollte Aufgrund der Bodenansprache in der Oxalatfraktion bereits erfasst werden. Im Allgemeinen liegen die Anteile der gut kristallisierten Fe-Oxide über denen der schlecht kristallisierten.

Die höchsten Mn-Gehalte (bis zu 84 %) wurden ebenfalls in der Residualfraktion ermittelt und zeigen vermutlich auch einen hohen Anteil silikatisch gebundener Mn-Oxide, deren tatsächlicher Anteil in der durchgeführten Extraktion nicht bestimmt wurde. Die ermittelten Mn-Werte zeigen einen relativ hohen (bis zu 38 %) Anteil der organischen Bindung der Manganoxide an.

Die möglichen Zusammenhänge zwischen den einzelnen Elementen konnten über Korrelationsanalysen dargestellt werden. Eine enge Beziehung, mit $R^2=0,93$, zeigt sich so zwischen Arsen und Eisen. Dagegen ist eine Wechselbeziehung zwischen organischen Gesamtkohlenstoffgehalten und Arsen, ($R^2=0,45$) oder Arsen mit Mangan ($R^2=0,40$), kaum nachweisbar.

Damit wird die Annahme, dass das Arsen geogener Herkunft ist und vorwiegend an Fe-Oxiden/Hydroxide in adsorbierter Form vorliegt, bestätigt.

Um die Mobilisierbarkeit des Arsens zu ermitteln wurde ein spezifischer Austausch mit Phosphat durchgeführt. Die Ergebnisse des Versuches zeigen, dass die untersuchten Böden phosphataustauschbares Arsen in der Feststoffphase sorbieren können. Jedoch zeigt der Versuch zusätzlich, dass die Bindung zum Eisen sehr stabil ist.

Als Richtlinie für Belastungen der Böden durch Arsen gilt die BBodSchV. Danach überschreiten die ermittelten As-Werte teilweise um ein Vielfaches die Vorgaben für den Schadstoffübergang Boden – Mensch in den Bereichen Kinderspielflächen, Wohngebiete, Park- und Freizeitanlagen und Industrie- bzw. Gewerbegrundstücke. Dagegen sind alle ermittelten pflanzenverfügbaren As-Werte in der Ammoniumnitrat-Lösung unterhalb des angegebenen Prüfwerts von 0,4 mg/kg TS.

Die ursprüngliche Herkunft des Arsens wird in den tertiären Sedimenten angenommen. Im Laufe der Bodenentwicklung konnte das arsen- und eisenhaltige tertiäre Grundwasser (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT 2001) durch hydraulische Fenster in die Böden gelangen und dort, durch kapillaren Aufstieg, die oberen Bodenhorizonte anreichern. Die durchgeführten Untersuchungen zeigen auch, dass Arsen unter reduzierenden Bedingungen mobil ist. Großflächige Versiegelungen oder Renaturalisierungsmaßnahmen könnten genau diese Bedingungen provozieren und eine Freisetzung des Arsens aus den Böden bewirken.

QUELLENVERZEICHNIS

- AG BODEN (1994): Bodenkundliche Kartieranleitung.- 4., Aufl. Nachdr., mit 33 Abb. und 91 Tab.; Hannover.
- ALLOWAY, B. J. [Hrsg.] (1999): Schwermetalle in Böden: Analytik, Konzentration, Wechselwirkungen.- Mit 40 Abbildungen und 83 Tabellen; (Springer).
- Arbeitsgruppe Umweltgeochemie (1998): Arsen in Böden Österreichs: Forschungsprojekt der Bund/Bundesländer-Kooperation.- Institut für Bodenforschung der Universität für Bodenkultur: 69 S.; Salzburg.
- AUERSWALD, K. (06.03.2001): Der Standort Versuchsgut Grünschwaige URL: http://www.weihenstephan.de/gruenland/gs/sk_d.htm, (08.03.2005).
- BAHRENBERG, G., GIESE, E., NIPPER, J. (1999): Statistische Methoden in der Geographie: Band 1 Univariate und bivariate Statistik.- Stuttgart (Teubner).
- BARSCHE, H., BILLWITZ, K., SCHOLZ, E. (1984): Labormethoden in der physischen Geographie.- Gotha.
- BAYER, M. (1997): Natürliche Arsenanreicherungen in der Oberen Süßwassermolasse Bayerns.- Veröffentlichungen des Grundbauinstitutes der Landesgewerbeanstalt Bayern, Heft **77**; (Eigenverlag LGA).
- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT [Hrsg. und Verlag] (2001): Grundwasser: Der unsichtbare Schatz.- SpektrumWasser **2**.
- Bodenschätzungskarte von Bayern 1:25000 (1958).- Herausgeber und Verlag: Bayerisches Geologisches Landesamt München.
- BRUNNACKER, K. (1959): Erläuterungen zur geologischen Karte von Bayern 1: 25000 Blatt Nr. 7636 Freising Süd.- Mit 8 Abb., 8 Tab. und 1 Beilage, Herausgeber und Verlag: Bayerisches Geologisches Landesamt München.
- BRUNNACKER, K. (1958/59): Bodenkarte von Bayern 1: 25000.- Herausgeber und Verlag: Bayerisches Geologisches Landesamt München.
- BRUNNACKER, K. (1959): Geologische Karte von Bayern 1: 25000.- Herausgeber und Verlag: Bayerisches Geologisches Landesamt München.
- BBodSchV (1999): Bundesgesetzblatt: Maßnahmen-, Prüf- und Vorsorgewerte; Bonn.
- CORNWELL, R.M. & SCHWERTMANN, U. (2003): The iron oxides.- 2. Aufl., 664 S.; Weinheim (Wiley)
- DEUTSCHER WETTERDIENST (1996 - 2005): Klimadaten in KL- Format. URL: http://www.dwd.de/de/FundE/Klima/KLIS/daten/online/nat/ausgabe_normwerte.htm, (26.07.2004).

- DIERKE- Wörterbuch Allgemeine Geographie (1997): LESER, H. [Hrsg.].- (Westermann).
- DIN 19 683, Blatt 4 (1973): Bestimmung des Wassergehaltes des Bodens.- Berlin.
- DIN 19 684, Teil 1 (1977): Bestimmung des pH- Wertes des Bodens und Ermittlung des Kalkbedarfs.- Berlin.
- DIN 19 684, Teil 2 (1977): Bestimmung des Humusgehaltes im Boden.- Berlin.
- DIN 19 684, Teil 3 (1977): Bestimmung des Glühverlustes und des Glührückstandes.- Berlin.
- DIN 19 730 (1977): Extraktion von Spurenelementen mit Ammoniumnitratlösung.- Berlin
- DIN 38 414, Teil 4 (1984): Bestimmung der Eluierbarkeit mit Wasser (S4).- Berlin.
- DIN ISO 11 466 1997-06 (1997): Aufschlüsse zur Bestimmung von Gesamtgehalten: Königswasser.- HBU Grundwerk 2000
- DURNER, W., NIEDER, R. (2003): Bodenkundliches Praktikum I.- TU Braunschweig, Institut für Geoökologie, Abteilung Bodenkunde und Bodenphysik. URL: <http://www.soil.tu-bs.de/lehre/Skripte/2003.Skript.BokuI-Praktikum.pdf> (08.04.2004).
- FETZER, K.D., GROTTENTHALER, W., HOFMANN, B., JERZ, H., RÜCKERT, G., SCHMIDT, F., WITTMANN, O. (1986): Standortkundliche Bodenkarte von Bayern 1: 50000 München - Augsburg und Umgebung.- Mit 15 Abb., 12 Tab. und 1 Beiheft (Analysen); Herausgeber und Verlag: Bayerisches Geologisches Landesamt München.
- FISCHER, W.R. & FECHTER, H. (1982): Analytische Bestimmung und Fraktionierung von Cu, Zn, Pb, Cd, Ni und Co in Böden und Unterwasserböden.- Z. Pflanzenernähr. Bodenk. **145**: 151-160, 1 Abb., 1 Tab.; Weinheim.
- FREUDENBERGER, W., SCHWERD, K. (1996): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:500 000.- 4. neubearbeitete Aufl., 67 Abb., 21 Tab. und 8 Beilagen; Herausgeber und Verlag: Bayerisches Geologisches Landesamt München.
- GLA (2002): ZDB- Schlüsselliste Petrographische Bezeichnung.- GLA-Fachberichte **19**: 29 S. und 65 S. Anhang (Listen).- Bayerisches Geologisches Landesamt.
- GLA (1998): Hintergrundwerte anorganischer Problemstoffe in Böden Bayerns.- GLA-Fachberichte **16**: 70 S.+88 S., 20 Abb., 17+145 Tab., 1 Kt.; Bayerisches Geologisches Landesamt.

- Gmelins Handbuch der anorganischen Chemie (1952): Arsen.- Völlig neu bearbeitete Auflage, mit 20 Figuren; (Verlag Chemie GmbH).
- HEINRICHS, G. (1996): Geogene Arsenkonzentrationen in Keupergrundwässern Frankens/ Bayern.- Hydrologie und Umwelt, **12**: 193 S., 70 Abb., 30 Tab.; Würzburg.
- HENNINGSEN, D., KATZUNG, G. (1998): Einführung in die Geologie Deutschlands.- 5., neu bearbeitete und erweiterte Aufl., 97 überwiegend farbige Abb., 9 Tab.; Stuttgart (Enke).
- HUTCHINSON, T.C. & MEEMA, K.M. (1987): Lead, Mercury, Cadmium and Arsenic in the Environment.- Published on behalf of the SCOPE **31**; (Wiley).
- HUTTER, C-P. [Hrsg.], KAPFER, A., POSCHLOD, P. (1997): Sümpfe und Moore: Biotope erkennen, bestimmen, schützen.- (Weitbrecht).
- JERZ, H. (1993): Geologie von Bayern II.: Das Eiszeitalter in Bayern, Erdgeschichte, Gesteine, Wasser, Boden.- Mit 74 Abb. und 17 Tab. im Text; (E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung).
- JORDAN, R. (1994): Zur Adsorption von Arsen an Tonminerale, natürliche Eisenverbindungen, Sande und Tone.- Dissertation; Fakultät für Chemie, Biologie und Geowissenschaften der TU München.
- KOHLER, H., FISCHER, H. (2000): Klappbares Periodensystem der Elemente.- (Bayerischer Schulbuch Verlag GmbH).
- LIEDTKE, H., MARCINEK, J. (2002): Physische Geographie Deutschlands.- 3., überarbeitete und erweiterte Aufl., 216 Abb. und 84 Tab.; Gotha (Perthes).
- LUPP, U. (1984): Erdinger Moos: Eine Zukunft als Flughafenlandschaft macht jede Vergangenheit überflüssig.- 2. überarbeitete Aufl.; München (Raben).
- MANZ, M. (1995): Umweltbelastungen durch Arsen und Schwermetalle in Böden, Halden und Schlacken ehemaliger Bergbaugebiete des Mittleren- und Südlichen Schwarzwaldes.- Karlsruher Geochemische Hefte, Bd. Nr. **7**: 227, 50 Abb.; Karlsruhe.
- MINKKINEN, P. & YLIRUOKANEN, I. (1978): The Arsenic Distribution in Finnish Peat Bogs.- Kemia-Kemi n:o **7-8**; Finland
- MURAWSKI, H., MEYER, W. (1998): Geologisches Wörterbuch.- 10., neu bearbeitete und erweiterte Aufl.; (Deutscher Taschenbuch Verlag, Ferdinand Enke).
- NORMAN, N.C. (1998): Chemistry of Arsenic, Antimony and Bismuth.- London (Blackie Academic & Professional).

- REGIONALER PLANUNGSVERBAND MÜNCHEN, BLUM, P. [Bearb.] (2002): URL: http://www.region-muenchen.com/regplan/rptext/b_bi/b_bi.htm, Kapitel BI Sicherung und Entwicklung der natürlichen Lebensgrundlagen- Ziele, (10.04.2005).
- RÜDE, T. R. (1996): Beiträge zur Geochemie des Arsens.- Karlsruher Geochemische Hefte, Bd. Nr. **10**: 206 S., 56 Abb.; Karlsruhe.
- SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL (1998): Lehrbuch der Bodenkunde.- 14., neu bearbeitete Aufl. von SCHACHTSCHABEL, P., BLUME, H.-P., BRÜMMER, G., HARTGE, K.H., SCHWERTMANN, U. [Hrsg.], 248 Abb, 100 Tab. Und 1 Farbtafel; (Enke).
- SCHLICHTING, E., BLUME, H-P., STAHR, K. (1995): Bodenkundliches Praktikum.- 2., neu bearbeitete Aufl., mit 46 Abb. und 60 Tab.; Berlin (Blackwell).
- SCHRÖTER, W., LAUTENSCHLÄGER, K.-H., BIBRACK, H., SCHNABEL, A. (1990): Chemie.- 18., verbesserte Aufl., 83 Bilder, 58 Tab.; Leipzig (Fachbuchverlag).
- SCHWERTMANN, U. (1964): Differenzierung der Eisenoxide des Bodens durch Extraktion mit Ammoniumoxalat-Lösung.- Z. Pflanzenernähr. Bodenk. **105**; Weinheim.
- TRETNER, A. (2002): Sorptions- und Redoxprozesse von Arsen an oxidischen Oberflächen: Experimentelle Untersuchungen.- Dissertation; Ruprecht-Karls Universität Heidelberg.
- UMWELTBUNDESAMT [Hrsg.] (1998): Arsen, Schwer- und Edelmetalle in Blut und Urin der Bevölkerung in Deutschland: Belastungsquellen- und Pfade.- Umwelt-Survey, Bd. **VII**: 221 S.
- ZEIEN, H. & BRÜMMER, G.W. (1989): Chemische Extraktionen zur Bestimmung von Schwermetallbildungsformen in Böden.- Mittl. Dtsch. Bodenkundl. Ges., **59/ 1**: 505-510; Hohenheim.
- ZEIEN, H. (1995): Chemische Extraktionen zur Bestimmung der Bindungsformen von Schwermetallen in Böden.- Bonner Bodenkundl. Abh., **17**: 284 S., 35 Abb., 89 Tab.; Bonn.

ANHANG

Anhang 1: Bodenkundliche Profilaufnahmen	71
1.1: Profil HH/1	71
1.2: Profil HH/2	71
1.3: Profil HH/3	72
 Anhang 2: Analysedaten der bodenchemischen Untersuchungen	 73
2.1: Elektrometrisch mit Glaselektrode ermittelte pH- Werte der Bodenprofile	73
2.2: Errechnete und gemessene Glühverlust- und Glührückstandswerte	73
2.3: Im Eluat der S4- Analyse bestimmte Parameter	74
2.4: Wassergehalt (in Gew.-%) und Berechnung des Trockenrückstandes (in %) der Bodenhorizonte	74
2.5: Ermittlung der Extinktionskoeffizienten α_1 und α_2 für die Berechnung des Humusgehaltes	75
2.6: Messwerte des angewendeten Kaliumdichromat- Schwefelsäure- Verfahrens	75
2.7: Kalziumkarbonat-Bestimmung nach SCHEIBLER	76
2.8: Messwerte der Gesamtkohlenstoffgehalt- Bestimmungen	76
2.9: Bestimmung der Eluierbarkeit mit Wasser (S4).	77
2.10: Messwerte der gelösten Kohlenstoffgehaltes (DOC) im S4-Eluat	77
2.11: In der Extraktion mit Ammonium- Nitrat gemessene Arsen-Werte	78
 Anhang 3: Ergebnisse der sequentiellen Fraktionen	 79
3.1: Ergebnisse der ermittelten Arsenwerte in den einzelnen Fraktionen	79
3.2: Ergebnisse der ermittelten Eisenwerte in den einzelnen Fraktionen	79
3.3: Ergebnisse der ermittelten Manganwerte der einzelnen Fraktionen	80
3.4: Vom Labor Ativation Laboratories Ltd. (Actlabs) ermittelten Daten	81
3.5: Messwerte des eingetauschten Phosphats bzw. des phosphataustausbaren Arsens (Schritt 1.)	83
3.6: Durch Austausch mit AsO_4 und oder Rücklösung von Phosphatfällungen aus dem Boden freigesetztes PO_4 und eingetauschte Arsenmenge (Schritt 2.)	83

Anhang 1: Bodenkundliche Profilaufnahmen

1.1: Profil HH/1

PROFILKENNUNG										PROJEKTKENNUNG				LAGE				ZUORDNUNG				AUFNAHME			
Obj.-Id	0		Blatt-Nr.	TK25	Aufn.-Serie	Profil-Nr.	Bereich	Thema	Bez.	R	9	4484407	Höhe	m ü. NN	Plog.	12	14	Landsch.-Einheit	Name	16	Königskötter	Aufschl.-Art	19		
Fremdkenn.	1	Dipl. HH/1	3		4	5	6	7	8	H	10	5359919	431		Lkr.	13	Freising Lkr.	15	Datum	17	10.02.2004				
Blattname TK25	2	Freising Süd	7636	70			LA	SU	O9						Gde.	14	Marzling	13.23	externe Aufn.	18	LMU- Geogr.	GS			
INTENSITÄT		KLIMA				NUTZUNG				RELIEF															
Aufnahme	20	AM	Temperatur	Niederschlag	Trockenh.	Index	aktuelle N.	Baumarten	Best.-Zust.	Inklination	Exposition	Reliefwölbung	vertikal	horizontal	Formtyp	Lage									
Beprobung	21	GV	23	24	25	27	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39									
Substratg.	21	NO	7 [°C]	750 [l/mm]	40	GE	-	-	-	[°]	KE	GO	GO	V	Z										
BODENSYST. E.		BODENFORM				SUBSTRATSYST. E.				HUMUSFORM				GW-STAND		BEMERKUNG									
43	HN	Kalkanmoorgley aus veredetem Niedermoor mit Alm- und Ockerausfällungen über Flussmergel				q-log-(H)/f-(k)t				nb				51 [cm]	8	52	a	A							
HORIZONTKENNZEICHNUNG				BODENFARBE				SKELETT				BODENART				HYDROM. MERKMALE				GEFÜGE					
Id.	Proben-Nr.	Symbol mit Kennzeichnung des Schichtwechsels	Grenze [cm]	Form	Schärfe	Munsell Hauptfarbe / Zusatzfarbe	Anteil von-bis (Vol.-%)	Grob-boden	Feinboden bzw. Torf-zers.- Stufe	HUMUS	CARBONAT	Rost fl.	Bleich fl.	Fe/Mn Konkret. Ant.	Gr.	AUSFÄLL.	Form	Größe	Schicht-Nr.	Schicht-Sym.	Bemerkung				
55	56	57	58	59	60	61A	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76				
1		I Ah	0- 18	w	de	7,5 YR 3/3	0	-	LS2	4	c4	-	-	-	-	CW	kru-sub	2	1	V1					
2		I Ah-Go	18- 26	w	sc	10 YR 3/6	0	-	Lu	3	c5	-	-	-	-	CW	kru-sub	3	1	V1					
3		II nHv	26- 43	e	di		0	-	5	7	0	-	-	-	-	(sub)-p	-	2	T						
4		II nHw	43- 55	e	de		0	-	5	7	0	-	-	-	-	(sub)-p	-	2	T						
5		III Gcr 1	55- 80	e	di	2,5 Y 4/2	10	g6	Tu2	1	c3	2	9	-	-	koh	-	3	V2						
6		III Gcr 2	80- 100+	-	-	10 Y 5/1	10	g6	Lts	0	c4	1	9	-	-	CW	koh	-	3	V2					
7																									
8																									
9																									
10																									

Legende: ☐ Feld ist vorbelegt, wird vom Rechner vergeben oder nachträglich ausgefüllt
Die Eintragungen erfolgen durch das GLA

Bayer. Geol. Landesamt, -Abt. Bodenkunde
Formblatt modifiziert für das Projekt GRABEN
(Stand: 03.2001)

1.2: Profil HH/2


PROFILKENNUNG										PROJEKTKENNUNG				LAGE				ZUORDNUNG				AUFNAHME			
Obj.-Id	0		Blatt-Nr.	TK25	Aufn.-Serie	Profil-Nr.	Bereich	Thema	Bez.	R	9	4487777	Höhe	m ü. NN	Plog.	12	14	Landsch.-Einheit	Name	16	Königskötter	Aufschl.-Art	19		
Fremdkenn.	1	Dipl. HH/2	3		4	5	6	7	8	H	10	5360616	431		Lkr.	13	Erding	15	Datum	17	31.03.2004				
Blattname TK25	2	Erding	7637	70			LA	SU	O9						Gde.	14	Eitling	13.23	externe Aufn.	18	LMU- Geogr.	GS			
INTENSITÄT		KLIMA				NUTZUNG				RELIEF															
Aufnahme	20	AM	Temperatur	Niederschlag	Trockenh.	Index	aktuelle N.	Baumarten	Best.-Zust.	Inklination	Exposition	Reliefwölbung	vertikal	horizontal	Formtyp	Lage									
Beprobung	21	GV	23	24	25	27	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39									
Substratg.	21	NO	[°C]	-	[l/mm]	40	G	-	-	-	[°]	KE	GO	GO	V	Z									
BODENSYST. E.		BODENFORM				SUBSTRATSYST. E.				HUMUSFORM				GW-STAND		BEMERKUNG									
43	HN	Anmoor mit flacher Mineralbodendecke über Torf über Karbonatkies				o-(k)lg-(H)/f-k(KST)				nb				51 [cm]	4,7	52	a	A							
HORIZONTKENNZEICHNUNG				BODENFARBE				SKELETT				BODENART				HYDROM. MERKMALE				GEFÜGE					
Id.	Proben-Nr.	Symbol mit Kennzeichnung des Schichtwechsels	Grenze [cm]	Form	Schärfe	Munsell Hauptfarbe / Zusatzfarbe	Anteil von-bis (Vol.-%)	Grob-boden	Feinboden bzw. Torf-zers.- Stufe	HUMUS	CARBONAT	Rost fl.	Bleich fl.	Fe/Mn Konkret. Ant.	Gr.	AUSFÄLL.	Form	Größe	Schicht-Nr.	Schicht-Sym.	Bemerkung				
55	56	57	58	59	60	61A	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76				
1		I Ah	0- 15	e	di	10YR 2/2	5	g1	LS3	4	c2	-	-	-	-	-	kru-sub	2	1	Y					
2		II nHv	15- 34	e	sc	5R 2/2	0	-	4	7	c1	1	-	-	-	-	(sub)	-3	2	T					
3		III Gor	34- 47	e	di	5Y 5/2	70	x6	Lts	1	c5	1	4	-	-	CW	ein	-	3	V					
4		III Gcr	47- 100+	-	-	5Y 7/2	100	g6	-	0	c5	-	9	-	-	-	ein	-	3	V					
5																									
6																									
7																									
8																									
9																									
10																									

Legende: ☐ Feld ist vorbelegt, wird vom Rechner vergeben oder nachträglich ausgefüllt
Die Eintragungen erfolgen durch das GLA

Bayer. Geol. Landesamt, -Abt. Bodenkunde
Formblatt modifiziert für das Projekt GRABEN
(Stand: 03.2001)

1.3: Profil HH/3

PROFILKENNUNG										PROJEKTKENNUNG				LAGE				ZUORDNUNG				AUFNAHME			
Obj.-Nr.	0		Blatt-Nr.	TK25	Aufn.-Serie	Prof.-Nr.	Bereich	Thema	Bez.	R	9	4486212	Höhe m ü. NN	Plog.	12	14	Landsch.-Einheit	Name	16	Königskötter Henrietta	Aufschl.-Art	19			
Fremdkenn.	1	Dipl. HH/3	3		4	5	6	7	8	H	10	5360477	437	Lkr.	13	14	15	Datum	17	20.04.2004					
Blattname TK25	2	Freising Süd	7636		70		LA	SU	O9					Gde.	14		13.23	externe Aufn.	18	LMU- Geogr.	GS				
INTENSITÄT		KLIMA				NUTZUNG				RELIEF															
Aufnahme	20	AM	Temperatur	Niederschlag	Trockenh. Index	aktuelle N.	Baumarten	Best.-Zust.	Inklination	Exposition	Reliefförmung vertikal	Reliefförmung horizontal	Formtyp	Lage											
Beprobung	21	GV	23	24	25	27	30	31	32	33	34	35	36	40											
Substratstr.	21	NO	[°C]	-	[1mm]	40	G	-	-	[°]	KE	GO	GO	V	Z										
BODENSYST. E.		BODENFORM				SUBSTRATSYST. E.				HUMUSFORM				GW-STAND		BEMERKUNG									
43	HNc	Stark vererdetes Niedermoor über karbonatreichem Flussschotter				og-(H)/f-kl				nb				61 [cm]	7,8	62	a	A							
HORIZONTKENNZEICHNUNG						BODENFARBE		SKELETT		BODENART		HYDROM. MERKMALE				GEFÜGE		Schicht-Nr.		Schicht-Sym.		Bemerkung			
lfd. Nr.	Proben-Nr.	Symbol mit Kennzeichnung des Schichtwechsels	Ober- bzw. Untergrenze	Grenze [cm]	Form	Schärfe	Munsell Hauptfarbe / Zusatzfarbe	Anteil von-bis (Vol.-%)	Grob-boden	Feinboden bzw. Torf-zers.- Stufe	HUMUS	CARBONAT	Rost fl.	Bleich fl.	Fe/Mn Konkret. Ant. Gr.	AUSFALL	Form	Größe	Schicht-Nr.	Schicht-Sym.	Bemerkung				
55	56	57	58	59	60	61A	5YR 2/2	0	-	s3	7	c1	-	-	-	-	CW	kru	2	1	T	B			
1		I nHvm	0-	13	e	di	5YR 2/2	0	-	s3	7	c1	-	-	-	-	CW	kru	2	1	T	B			
2		I nHcv	13-	25	w	di	10R 2/2	0	-	3	7	c3	-	-	-	-	CW		-	1	T				
3		II eHcw	25-	48	eg	sc	5YR 3/2	10	g1	5	7	c4	2	3	-	-	-		-	2	T				
4		III Gcr	48-	78+	-	-	10YR 6/2	50	g4	Lts	0	c4	-	9	-	-	-	ein	-	3	V				
5																									
6																									
7																									
8																									
9																									
10																									

Legende:  Feld ist vorbelegt, wird vom Rechner vergeben oder nachträglich ausgefüllt
Die Eintragungen erfolgen durch das GLA

Bayer. Geol. Landesamt, -Abt. Bodenkunde
Formblatt modifiziert für das Projekt GRABEN
(Stand: 03.2001)

Anhang 2: Analysedaten der bodenchemischen Untersuchungen

2.1: Elektrometrisch mit Glaselektrode ermittelte pH-Werte der Bodenprofile

Profil	Tiefe (cm)	Horizont	pH- Wert
HH1-1	-18	Ah	7,34
HH1-2	-26	Ah-Go	7,33
HH1-3	-43	nHv	7,18
HH1-4	-55	nHw	7,07
HH1-5	-80	Gcr1	7,29
HH1-6	-100 ⁺	Gcr2	7,55
HH2-1	-15	Ah	6,82
HH2-2	-34	nHv	6,91
HH2-3	-47	Gor	7,63
HH2-4	-100 ⁺	Gcr	7,82
HH3-1	-13	nHvm	7,18
HH3-2	-25	nHcv	7,15
HH3-3	-48	eHw	7,32
HH3-4	-78 ⁺	Gcr	7,52

2.2: Errechnete und gemessene Glühverlust- und Glührückstandswerte in Gew.-%

Profil	Tiefe (cm)	Horizont	Einwaage (g)	Schale in g	Schale+ Probe	Glührückstand in g	Glührückstand in Gew.-%	Glühverlust in Gew.-%
HH1-1	-18	Ah	15,0	78,0	89,7	11,7	78,0	22,0
HH1-2	-26	Ah-Go	10,5	75,2	82,7	7,44	70,9	29,1
HH1-3	-43	nHv	15,0	33,8	43,6	9,72	64,8	35,2
HH1-4	-55	nHw	15,0	75,2	86,6	11,4	75,9	24,1
HH1-5	-80	Gcr1	15,0	32,2	46,3	14,1	94,3	5,73
HH1-6	-100 ⁺	Gcr2	15,0	29,2	43,8	14,5	96,9	3,07
HH2-1	-15	Ah	8,00	33,1	38,4	5,35	66,9	33,1
HH2-2	-34	nHv	8,00	78,4	83,0	4,60	57,5	42,5
HH2-3	-47	Gor	6,19	76,2	82,0	5,85	94,5	5,49
HH2-4	-100 ⁺	Gcr	10,7	33,8	44,4	10,6	98,7	1,30
HH3-1	-13	nHvm	11,0	75,2	80,0	4,77	43,3	56,7
HH3-2	-25	nHcv	9,81	33,8	38,1	4,27	43,5	56,5
HH3-3	-48	eHw	10,0	77,1	82,2	5,06	50,6	49,4
HH3-4	-78 ⁺	Gcr	10,0	33,1	42,7	9,64	96,1	3,89

2.3: Im Eluat der S4- Analyse bestimmte Parameter: Elektrische Leitfähigkeit, pH-Wert und ermittelte Salzgehalte der Profile

Profil	Tiefe (cm)	Horizont	Leitfähigkeit in $\mu\text{S/cm}$	pH- Wert	Salzgehalt in %
HH1-1	-18	Ah	228	7,55	0,07
HH1-2	-26	Ah-Go	179	7,49	0,06
HH1-3	-43	nHv	101	7,26	0,03
HH1-4	-55	nHw	72	6,87	0,02
HH1-5	-80	Gcr1	122	7,1	0,04
HH1-6	-100 ⁺	Gcr2	132	7,27	0,04
HH2-1	-15	Ah	149	7,17	0,05
HH2-2	-34	nHv	102	7,37	0,03
HH2-3	-47	Gor	94	7,65	0,03
HH2-4	-100 ⁺	Gcr	84	7,76	0,03
HH3-1	-13	nHvm	281	7,73	0,09
HH3-2	-25	nHcv	264	7,88	0,08
HH3-3	-48	eHw	131	7,97	0,04
HH3-4	-78 ⁺	Gcr	196	8,02	0,06

2.4: Wassergehalt (in Gew.-%) und Berechnung des Trockenrückstandes (in %) der Bodenhorizonte

Profil	Tiefe (cm)	Horizont	Feucht-probe	Trocken-probe	Wassergehalt in Gew.-%	TrockenRS. In %
HH1-1	-18	Ah	112	58,9	47,5	0,53
HH1-2	-26	Ah-Go	9,01	4,11	54,4	0,46
HH1-3	-43	nHv	110	28,5	74,0	0,26
HH1-4	-55	nHw	125	47,0	62,4	0,38
HH1-5	-80	Gcr1	179	129	28,1	0,72
HH1-6	-100 ⁺	Gcr2	194	154	20,8	0,79
HH2-1	-15	Ah	15,9	8,37	47,2	0,53
HH2-2	-34	nHv	29,1	9,31	68,0	0,32
HH2-3	-47	Gor	30,5	26,0	14,6	0,85
HH2-4	-100 ⁺	Gcr	37,3	33,6	9,90	0,90
HH3-1	-13	nHvm	87,5	26,4	69,8	0,30
HH3-2	-25	nHcv	93,7	25,2	73,1	0,27
HH3-3	-48	eHw	92,1	26,2	71,6	0,28
HH3-4	-78 ⁺	Gcr	165	139	15,8	0,84

2.5: Ermittlung der Extinktionskoeffizienten α_1 und α_2 für die Berechnung des Humusgehaltes in Gew.-%

Nr.	Einwaage $K_2Cr_2O_7$ (g)	Extinktion	Chrom(III) Einwaage	α_1	Mittelwert
1	0,40	1,21	0,21	5,87	5,88
2	0,40	1,23	0,21	5,94	
3	0,40	1,21	0,21	5,84	
4	0,40	1,22	0,21	5,91	
5	0,40	1,21	0,21	5,85	
Blindwert				α_2	
6	9,00	0,57		0,06	0,06
7	9,00	0,53		0,06	

2.6: Messwerte des angewendeten Kaliumdichromat- Schwefelsäure- Verfahrens

Profil	Tiefe (cm)	Horizont	Einwaage (mg)	Extinktion (590nm)	Extinktion- BW	C- Gehalt in Gew.-%	Humusgehalt in Gew.-%
HH1-1	-18	Ah	500	2,55	2,36	9,65	16,6
HH1-2	-26	Ah- Go	500	2,21	2,02	8,26	14,2
HH1-3	-43	nHv	494	2,71	2,52	10,4	18,0
HH1-4	-55	nHw	500	2,66	2,47	10,1	17,4
HH1-5	-80	Gcr1	1000	0,99	0,80	1,62	2,79
HH1-6	-100 ⁺	Gcr2	1000	0,37	0,18	0,34	0,59
Referenzprobe			1000	1,33	1,14	2,31	3,98
HH2-1	-15	Ah	500	2,75	2,56	10,5	18,0
HH2-2	-34	nHv	501	2,72	2,53	10,3	17,8
HH2-3	-47	Gor	1000	0,87	0,68	1,36	2,35
HH2-4	-100 ⁺	Gcr	1000	0,34	0,15	0,27	0,47
Referenzprobe			1001	1,34	1,15	2,34	4,03
HH3-1	-13	nHvm	500	2,72	2,53	10,3	17,8
HH3-2	-25	nHcv	500	2,74	2,55	10,4	18,0
HH3-3	-48	eHw	500	2,44	2,25	9,21	15,9
HH3-4	-78 ⁺	Gcr	1001	0,92	0,72	1,46	2,52
Referenzprobe			1001	1,34	1,15	2,34	4,03

Extinktion der Blindproben. Die Werte wurden von den ermittelten Extinktionen der Bodenproben subtrahiert (Extinktion BW) und in der Berechnung weiter verwendet.

BW1	0,163
BW2	0,220
Mittelwert:	0,192

2.7: Kalziumkarbonat-Bestimmung nach SCHEIBLER. Aus den CaCO_3 - Werten wurden die anorganischen Kohlenstoff-Gehalte (C_{an}) ermittelt

<i>Profil</i>	<i>Tiefe (cm)</i>	<i>Horizont</i>	<i>Einwaage (g)</i>	<i>ml CO₂</i>	<i>% CaCO₃</i>	<i>% C_{an}</i>
HH1-1	-18	Ah	0,51	34,0	24,0	2,91
HH1-2	-26	Ah-Go	0,51	14,2	10,0	1,21
HH1-3	-43	nHv	0,54	0,60	0,40	0,05
HH1-4	-55	nHw	0,50	0,20	0,14	0,02
HH1-5	-80	Gcr1	0,52	38,2	26,4	3,20
HH1-6	-100 ⁺	Gcr2	0,51	54,2	38,2	4,63
HH2-1	-15	Ah	0,52	10,2	7,06	0,86
HH2-2	-34	nHv	0,57	5,00	3,16	0,38
HH2-3	-47	Gor	0,58	66,8	41,4	5,02
HH2-4	-100 ⁺	Gcr	0,50	75,6	54,4	6,59
HH3-1	-13	nHvm	0,5	7,40	5,33	0,65
HH3-2	-25	nHcv	0,55	9,00	5,89	0,71
HH3-3	-48	eHw	0,56	93,0	59,8	7,24
HH3-4	-78 ⁺	Gcr	0,50	98,4	70,8	8,58

<i>Eichprobe</i>	<i>Einwaage (g)</i>	<i>ml CO₂</i>	<i>% CaCO₃</i>	<i>% C_{an}</i>
	0,29	80,6	100	12,119

2.8: Messwerte der Gesamtkohlenstoffgehalt- Bestimmungen (CNS- Gerät)

<i>Profil</i>	<i>Tiefe (cm)</i>	<i>Horizont</i>	<i>C_{ges}</i>
HH1-1	-18	Ah	16,2
HH1-2	-26	Ah-Go	12,6
HH1-3	-43	nHv	26,8
HH1-4	-55	nHw	15,8
HH1-5	-80	Gcr1	4,83
HH1-6	-100 ⁺	Gcr2	5,34
HH2-1	-15	Ah	17,7
HH2-2	-34	nHv	25,7
HH2-3	-47	Gor	6,72
HH2-4	-100 ⁺	Gcr	6,99
HH3-1	-13	nHvm	34,4
HH3-2	-25	nHcv	34,8
HH3-3	-48	eHw	21,8
HH3-4	-78 ⁺	Gcr	10,7

<i>Tagesfaktoren:</i>	<i>N</i>	<i>1,002</i>
	<i>C</i>	<i>1,001</i>
	<i>S</i>	<i>1,015</i>

2.9: Bestimmung der Eluierbarkeit mit Wasser (S4). Datenblatt der im Eluat gemessenen und errechneten Elemente As, Fe und Mn

			Massenanteil Originalprobe in mg/kg			Massenanteil bezogen auf den Trockenrückstand der Probe in mg/kg		
Profil	Tiefe (cm)	Horizont	As	Fe	Mn	As	Fe	Mn
HH1-1	-18	Ah	1,91	151	1,49	3,63	2,88	0,03
HH1-2	-26	Ah-Go	5,81	390	2,41	11,1	7,43	0,05
HH1-3	-43	nHv	0,85	109	0,53	3,26	4,20	0,02
HH1-4	-55	nHw	2,53	417	1,39	6,74	11,1	0,04
HH1-5	-80	Gcr1	0,46	226	0,97	0,64	3,15	0,01
HH1-6	-100 ⁺	Gcr2	0,12	40,6	0,30	0,15	0,51	0,004
HH2-1	-15	Ah	0,37	100	2,54	0,70	1,90	0,05
HH2-2	-34	nHv	0,61	200	3,18	1,91	6,27	0,10
HH2-3	-47	Gor	0,28	433	5,92	0,32	5,07	0,07
HH2-4	-100 ⁺	Gcr	0,09	79,5	0,40	0,10	0,88	0,004
HH3-1	-13	nHvm	0,138	23,3	0,2	0,46	0,77	0,01
HH3-2	-25	nHcv	0,192	33,2	0,26	0,71	1,23	0,01
HH3-3	-48	eHw	0,090	14,8	0,1	0,32	0,52	0,0035
HH3-4	-78 ⁺	Gcr	0,030	12,35	-0,03	0,04	0,15	-0,0004

2.10: Messwerte der gelösten Kohlenstoffgehaltes (DOC) im S4-Eluat im TOC-Gerät

Profil	Tiefe (cm)	Horizont	c (TOC)	c (IC)	c (TC)
HH1-1	-18	Ah	27,65 ± 0,5 mg/l	14,74 ± 0,2 mg/l	42,40 ± 0,5 mg/l
HH1-2	-26	Ah-Go	24,99 ± 0,1 mg/l	12,71 ± 0,1 mg/l	37,70 ± 0,1 mg/l
HH1-3	-43	nHv	81,52 ± 0,3 mg/l	4,87 ± 0,0 mg/l	86,39 ± 0,3 mg/l
HH1-4	-55	nHw	151,11 ± 0,9 mg/l	786,1 ± 17,2 µg/l	151,90 ± 1,0 mg/l
HH1-5	-80	Gcr1	37,27 ± 0,2 mg/l	8,85 ± 0,1 mg/l	46,12 ± 0,1 mg/l
HH1-6	-100 ⁺	Gcr2	7,02 ± 0,0 mg/l	8,57 ± 0,1 mg/l	15,59 ± 0,1 mg/l
HH2-1	-15	Ah	38,65 ± 0,5 mg/l	12,32 ± 0,1 mg/l	50,97 ± 0,6 mg/l
HH2-2	-34	nHv	69,24 ± 1,1 mg/l	7,69 ± 0,1 mg/l	76,92 ± 1,1 mg/l
HH2-3	-47	Gor	43,73 ± 0,3 mg/l	9,51 ± 0,1 mg/l	53,25 ± 0,3 mg/l
HH2-4	-100 ⁺	Gcr	11,67 ± 0,3 mg/l	6,79 ± 0,1 mg/l	18,46 ± 0,2 mg/l
HH3-1	-13	nHvm	38,05 ± 0,1 mg/l	16,23 ± 0,0 mg/l	54,28 ± 0,1 mg/l
HH3-2	-25	nHcv	39,89 ± 0,3 mg/l	15,24 ± 0,1 mg/l	55,13 ± 0,3 mg/l
HH3-3	-48	eHw	40,95 ± 1,2 mg/l	12,12 ± 0,1 mg/l	53,07 ± 1,2 mg/l
HH3-4	-78 ⁺	Gcr	12,11 ± 0,1 mg/l	8,69 ± 0,0 mg/l	20,80 ± 0,1 mg/l

2.11: In der Extraktion mit Ammonium- Nitrat gemessene Arsen-Werte in µg/kg

Profil	Tiefe (cm)	Horizont	Einwaage (g)	gem. As in µg/L	As in µg/L korrigiert	As in µg/kg	V_{el} in ml
HH1-1	-18	Ah	20	7,48	7,47	18,8	50
HH1-2	-26	Ah-Go	20	2,93	2,92	7,33	50
HH1-3	-43	nHv	20	1,58	1,57	3,94	50
HH1-4	-55	nHw	20	0,41	0,40	1,01	50
HH1-5	-80	Gcr1	20	0,97	0,96	2,42	50
HH1-6	-100 ⁺	Gcr2	20	3,16	3,15	7,94	50
HH2-1	-15	Ah	20	2,47	2,46	6,19	50
HH2-2	-34	nHv	20	2,00	1,99	4,98	50
HH2-3	-47	Gor	20	0,44	0,43	1,08	50
HH2-4	-100 ⁺	Gcr	20	0,76	0,75	1,88	50
HH3-1	-13	nHvm	20	1,07	1,05	2,64	50
HH3-2	-25	nHcv	20	0,84	0,82	2,07	50
HH3-3	-48	eHw	20	1,22	1,21	3,03	50
HH3-4	-78 ⁺	Gcr	20	1,21	1,20	3,02	50

Anhang 3: Ergebnisse der sequentiellen Fraktionen

3.1: Ergebnisse der ermittelten Arsenwerte in den einzelnen Fraktionen in mg/kg TS

Profil	Tiefe (cm)	Horizont	Fraktion 1	Fraktion 2	Fraktion 3	Fraktion 4	Fraktion 5	Fraktion 6	Fraktion 7	Summe As mg/kg TS
HH1-1	-18	Ah	17,7	5,43	0,78	3,29	205	672	399	1303
HH1-2	-26	Ah-Go	18,0	6,95	0,89	4,09	317	960	2756	4063
HH1-3	-43	nHv	10,5	3,47	1,62	10,1	134	84,3	46,8	291
HH1-4	-55	nHw	5,85	2,73	0,36	3,86	33,5	77,6	21,6	146
HH1-5	-80	Gcr1	1,53	0,58	0,03	0,76	7,22	3,38	4,59	18,1
HH1-6	-100 ⁺	Gcr2	1,16	0,04	0,11	0,66	2,85	1,56	2,77	9,14
HH2-1	-15	Ah	4,81	1,67	0,52	8,28	46,5	250	37,6	349
HH2-2	-34	nHv	3,93	2,39	0,59	1,48	45,5	191	67,9	312
HH2-3	-47	Gor	0,19	0,01	0,00	0,01	7,14	5,94	5,17	18,5
HH2-4	-100 ⁺	Gcr	0,27	0,00	0,00	0,02	6,11	1,43	2,36	10,2
HH3-1	-13	nHvm	2,65	0,89	1,00	3,77	93,6	92,1	32,7	227
HH3-2	-25	nHcv	5,06	2,55	0,62	1,84	84,5	114	38,7	247
HH3-3	-48	eHw	0,53	0,18	0,03	0,02	2,76	9,58	2,35	15,4
HH3-4	-78 ⁺	Gcr	0,27	0,01	0,02	0,01	1,70	1,58	1,45	5,03

Fraktionnr.	Chemikalien
1	NH ₄ F
2	NH ₄ OAc
3	NH ₂ OH-HCl
4	EDTA
5	NH ₄ -Oxalat
6	NH ₄ -Oxalat+ Ascorbinsäure
7	Königswasser

3.2: Ergebnisse der ermittelten Eisenwerte in den einzelnen Fraktionen in mg/kg TS

Profil	Tiefe (cm)	Horizont	Fraktion 1	Fraktion 2	Fraktion 3	Fraktion 4	Fraktion 5	Fraktion 6	Fraktion 7	Summe Fe mg/kg TS
HH1-1	-18	Ah	374	228	9,55	1011	10785	44930	34983	91309
HH1-2	-26	Ah-Go	457	385	28,2	1006	11910	53830	242667	309277
HH1-3	-43	nHv	1273	522	90,0	2241	7672	6488,0	7046,6	23091
HH1-4	-55	nHw	388	294	5,48	510	2744	8882	9226	21539
HH1-5	-80	Gcr1	13,1	23,3	0,77	189	2660	3038	8581	14316
HH1-6	-100 ⁺	Gcr2	0,99	0,18	10,3	521	3797	2698	7612	14119
HH2-1	-15	Ah	494	258	17,5	3288	11535	27930	22367	62602
HH2-2	-34	nHv	787	643	98,7	1784	10340	38410	33164	83442
HH2-3	-47	Gor	9,95	0,19	13,1	274	10878	7254	7857	26013
HH2-4	-100 ⁺	Gcr	3,83	0,16	18,5	177	9874	1742	2870	14509
HH3-1	-13	nHvm	766	278	158	3732	1740	23410	6812	33164
HH3-2	-25	nHcv	1247	642	96	3829	13865	22495	8189	46534
HH3-3	-48	eHw	68,7	49,4	2,04	213	1067	1650	816	3652
HH3-4	-78 ⁺	Gcr	5,53	0,14	6,23	96,5	908	1257	1605	3781

3.3: Ergebnisse der ermittelten Manganwerte der einzelnen Fraktionen in mg/kg TS

Profil	Tiefe (cm)	Horizont	Fraktion 1	Fraktion 2	Fraktion 3	Fraktion 4	Fraktion 5	Fraktion 6	Fraktion 7	Summe Mn mg/kg TS
HH1-1	-18	Ah	7,19	4,77	180	503	155	74,6	665	1589
HH1-2	-26	Ah-Go	3,89	3,44	62,6	366	93,3	23,0	1608	2160
HH1-3	-43	nHv	7,18	3,86	5,62	36,7	24,1	15,4	103,7	197
HH1-4	-55	nHw	1,96	2,01	1,56	8,58	11,4	22,6	77,4	126
HH1-5	-80	Gcr1	0,26	1,12	0,42	3,79	2,25	10,3	99,3	117
HH1-6	-100 ⁺	Gcr2	0,27	6,91	7,21	18,8	6,19	13,8	158	211
HH2-1	-15	Ah	10,6	10,6	124	431	179	115	625	1495
HH2-2	-34	nHv	15,1	16,9	88,9	467	164	79,5	548	1379
HH2-3	-47	Gor	0,58	3,49	454	533	122	37,1	354	1505
HH2-4	-100 ⁺	Gcr	0,22	6,72	12,6	31,4	68,2	10,9	125	255
HH3-1	-13	nHvm	8,98	5,07	21,4	176	3,52	46,7	198	460
HH3-2	-25	nHcv	14,3	9,00	19,5	184	65,6	28,5	184	505
HH3-3	-48	eHw	1,55	0,83	12,2	21,3	18,1	9,37	58,2	121
HH3-4	-78 ⁺	Gcr	0,19	0,67	13,52	16,6	11,3	8,04	101	151

Fraktionnr.	Chemikalien
1	NH ₄ F
2	NH ₄ OAc
3	NH ₂ OH-HCl
4	EDTA
5	NH ₄ -Oxalat
6	NH ₄ -Oxalat+ Ascorbinsäure
7	Königswasser

3.4: Vom Labor Ativation Laboratories Ltd. (Actlabs) ermittelten Daten, Seite 1

41645RPT.XLS

Actlabs Ultratracs 1 Job #: A04-1645 Report#: A04-1645 Client: L.M.U. Contact: T. Rude

Trace Element Values Are in Parts Per Million unless otherwise indicated. Negative Values Equal Not Detected at That Lower Limit.

Values = 999999 are greater than working range of instrument.

Sample ID:

Li	Be	B	Na	Mg	Al	K	Ca	Sc	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Ag	Cd	In	Sn	Sb
14.4	0.8	3	0.024	1.15	0.99	0.08	10.6	1.3	86	42.3	2180	7.98	6.9	32.5	20.0	86.4	3.92	-0.1	1400	1.3	8.0	120	6.10	5.1	1.2	1.95	0.502	0.7	0.02	0.90	0.91
8.4	0.4	1	0.018	0.57	0.75	0.05	4.63	1.6	24	15.8	2700	33.8	8.2	28.2	8.69	76.3	2.23	0.2	4570	1.2	4.1	63.8	2.98	14.4	0.4	6.28	0.412	0.3	-0.02	0.32	0.67
26.8	1.3	1	0.016	0.50	1.67	0.14	3.20	3.2	47	26.4	176	2.38	2.7	31.5	50.6	26.1	4.54	-0.1	287	2.5	9.4	74.9	10.4	7.7	0.8	0.98	0.476	1.1	0.02	0.40	0.40
46.6	1.6	1	0.022	0.77	3.06	0.27	2.39	4.8	49	42.4	154	2.51	5.3	29.9	21.7	47.9	7.70	-0.1	156	1.4	17.7	62.0	11.9	6.3	0.8	0.78	0.428	0.3	0.03	0.52	0.27
23.9	0.8	-1	0.021	4.99	1.40	0.18	5.10	3.3	31	26.9	190	1.61	8.5	35.6	12.4	53.4	4.40	-0.1	20.5	0.7	13.4	41.1	10.4	2.3	1.1	0.66	0.448	0.1	0.02	0.33	0.14
16.3	0.5	-1	0.030	4.46	1.15	0.10	12.9	2.1	26	22.0	227	1.52	6.0	23.2	12.9	55.3	3.70	-0.1	9.6	0.3	10.9	107	7.95	2.3	0.6	0.59	0.420	-0.1	-0.02	0.28	0.15
8.4	0.7	1	0.019	1.19	0.81	0.08	3.98	0.9	55	26.7	2530	8.22	7.5	23.9	29.3	91.8	2.68	-0.1	274	1.8	6.5	82.4	9.97	2.6	0.9	3.11	0.534	0.9	-0.02	0.54	1.35
4.1	0.5	1	0.013	0.26	0.56	0.03	3.30	0.3	22	12.9	1170	7.95	4.5	24.1	26.8	22.2	1.95	-0.1	302	2.4	2.8	67.2	6.83	2.7	0.5	3.96	0.498	0.6	-0.02	0.22	1.40
11.6	0.6	-1	0.021	2.33	0.83	0.11	12.2	1.8	20	29.5	2150	2.78	8.7	29.1	10.6	23.9	2.20	-0.1	21.6	0.9	7.7	243	11.2	1.3	0.6	1.06	0.566	0.1	-0.02	0.21	0.17
6.2	0.2	-1	0.027	3.84	0.42	0.08	18.5	0.6	11	10.5	264	0.74	2.2	10.3	4.72	15.3	1.22	-0.1	7.7	0.4	6.0	267	4.93	0.7	0.2	0.53	0.545	-0.1	-0.02	0.12	0.10
1.8	0.3	2	0.045	0.21	0.24	0.07	5.23	-0.1	38	16.4	626	4.31	3.3	10.2	34.2	143	0.89	-0.1	220	1.9	1.1	66.4	2.61	2.5	0.7	2.02	0.580	0.5	-0.02	1.46	1.73
1.3	0.2	1	0.023	0.10	0.24	0.02	5.88	-0.1	16	9.0	317	4.98	2.8	10.0	33.2	122	0.97	-0.1	245	1.6	0.8	66.9	1.36	1.2	0.3	2.03	0.772	0.4	-0.02	1.00	1.51
1.2	0.1	-1	0.022	0.62	0.13	0.02	19.8	0.2	5	4.5	160	0.44	1.2	3.7	12.1	16.5	0.24	-0.1	15.3	1.6	1.0	182	1.52	1.8	0.3	0.37	0.374	0.2	-0.02	0.19	0.27
4.0	0.2	-1	0.027	2.14	0.31	0.05	26.4	0.7	9	8.3	208	0.52	1.8	4.3	4.64	17.3	0.97	-0.1	9.0	0.8	4.2	300	3.09	1.4	0.4	0.39	0.350	0.1	-0.02	0.15	0.10

Control Material GXR-6

Control Material GXR-2

Control Material GXR-1

Control Material GXR-4

Cert Data GXR-6

Cert Data GXR-2

Cert Data GXR-1

Cert Data GXR-4

Certified By:


C. Douglas Read, BSc.
Laboratory Manager, Activation Laboratories Ltd.

Date Received: 23-Jun-04

This report shall not be reproduced except in full without the written approval of the laboratory.
Unless otherwise instructed, samples will be disposed of 90 days from the date of this report.

Date Reported: 06-Jul-04

Fortsetzung 3.4: Seite 2

41645RPT.XLS																												
Actlabs Ultratrace 1 Jo																												
Trace Element Values Ar																												
Values = 999999 are gre																												
Sample ID:	Te	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Au	PPB	Tl	Pb	Bi	Th	U
HH1-1	0.06	1.0	210	8.7	13.4	2.0	8.05	1.5	0.4	1.6	0.2	1.1	0.2	0.6	-0.1	0.4	-0.1	-0.1	-0.05	1.9	0.001	74.8	0.19	34.2	0.25	0.7	2.2	
HH1-2	0.04	0.6	147	3.7	6.06	0.9	3.55	0.7	0.2	0.7	0.1	0.5	0.1	0.2	-0.1	0.2	-0.1	-0.1	-0.05	0.4	0.001	22.8	0.09	13.6	0.11	0.9	2.8	
HH1-3	0.12	1.4	233	10.0	14.7	2.5	10.4	2.1	0.5	2.1	0.3	1.6	0.3	0.8	0.1	0.7	-0.1	0.3	-0.05	0.3	0.008	16.8	0.28	9.98	0.25	2.1	7.3	
HH1-4	0.10	1.7	301	14.8	22.8	3.8	14.9	3.1	0.7	3.0	0.4	2.1	0.4	1.0	0.1	0.9	0.1	0.2	-0.05	0.2	0.007	2.1	0.36	17.2	0.23	3.7	4.1	
HH1-5	0.02	1.4	128	18.0	32.5	4.4	18.7	3.4	0.8	3.2	0.5	2.1	0.4	1.0	0.1	0.8	0.1	-0.1	-0.05	0.2	0.002	-0.2	0.18	12.4	0.18	4.6	2.2	
HH1-6	0.04	1.1	99.5	13.5	23.5	3.5	13.2	2.7	0.5	2.8	0.3	1.9	0.3	0.8	0.1	0.7	-0.1	-0.1	-0.05	-0.1	0.002	-0.2	0.12	9.57	0.16	4.1	1.7	
HH2-1	0.04	0.6	133	11.9	16.4	2.6	10.3	1.9	0.5	2.0	0.3	1.5	0.3	0.8	0.1	0.7	0.1	-0.1	-0.05	1.0	0.003	-0.2	0.13	30.6	0.23	1.0	6.6	
HH2-2	0.03	0.3	82.6	5.7	8.08	1.3	5.07	1.0	0.2	1.1	0.2	1.0	0.2	0.5	-0.1	0.5	-0.1	-0.1	-0.05	0.3	0.003	-0.2	0.07	18.4	0.15	0.5	9.5	
HH2-3	0.05	0.5	58.9	11.3	15.9	2.6	11.1	2.1	0.5	2.3	0.3	1.8	0.4	0.9	0.1	0.8	0.1	-0.1	-0.05	0.1	-0.001	-0.2	0.09	7.24	0.12	1.9	2.1	
HH2-4	0.03	0.4	29.5	5.8	8.78	1.4	5.75	1.1	0.2	1.2	0.2	0.9	0.2	0.4	-0.1	0.4	-0.1	-0.1	-0.05	-0.1	-0.001	-0.2	0.05	4.16	0.05	1.1	1.3	
HH3-1	0.05	0.1	119	2.7	4.45	0.6	2.41	0.5	0.1	0.5	-0.1	0.4	-0.1	0.2	-0.1	0.2	-0.1	0.2	-0.05	0.9	0.003	23.2	0.07	36.0	0.29	0.4	5.1	
HH3-2	0.04	-0.1	119	1.6	2.91	0.4	1.34	0.3	-0.1	0.3	-0.1	0.2	-0.1	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.05	0.4	0.006	3.9	0.04	27.8	0.22	0.2	6.5	
HH3-3	0.04	0.1	95.4	1.2	2.76	0.3	1.10	0.2	-0.1	0.3	-0.1	0.2	-0.1	0.1	-0.1	0.1	-0.1	0.1	-0.05	-0.1	0.004	-0.2	0.03	1.40	0.07	0.2	3.3	
HH3-4	0.07	0.3	105	3.9	6.24	0.9	3.61	0.7	0.1	0.7	-0.1	0.5	0.1	0.3	-0.1	0.2	-0.1	-0.1	-0.05	-0.1	-0.001	-0.2	0.04	2.65	0.05	0.8	1.2	
Control Material GXR-6	0.03	3.3	1070	11.0	25.9	2.7	10.5	2.2	0.5	1.9	0.3	1.3	0.3	0.7	0.1	0.7	-0.1	0.1	-0.05	-0.1	-0.001	58.2	1.88	95.8	0.14	2.9	0.8	
Control Material GXR-2	0.29	3.3	1390	17.5	28.6	4.0	14.3	2.7	0.5	2.4	0.3	1.6	0.3	0.8	0.1	0.6	-0.1	-0.1	-0.05	-0.1	-0.001	32.4	0.62	521	0.23	3.1	1.2	
Control Material GXR-1	14.2	3.0	521	4.2	9.18	1.4	6.44	2.3	0.5	3.6	0.7	4.3	0.9	2.5	0.4	2.2	0.3	-0.1	-0.05	1.71	0.002	3420	0.39	698	1430	1.6	33.5	
Control Material GXR-4	0.87	2.2	38.3	45.9	71.1	9.4	34.0	5.0	1.2	4.1	0.5	2.2	0.4	0.9	0.1	0.8	-0.1	0.2	-0.05	9.1	0.148	509	2.67	38.3	14.8	14.7	4.2	
Cert Data GXR-6	0.018	4.2	1,300	13.9	36	-	13	2.67	0.76	2.97	0.415	2.8	-	-	0.032	2.4	0.33	4.3	0.485	1.9	-	95	2.2	101	0.29	5.3	1.54	
Cert Data GXR-2	0.69	5.2	2,240	25.6	51.4	-	19	3.5	0.81	3.3	0.48	3.3	-	-	0.3	2.04	0.27	8.3	0.9	1.9	-	36	1.03	690	0.69	8.8	2.9	
Cert Data GXR-1	13	3	750	7.5	17	-	18	2.7	0.69	4.2	0.83	4.3	-	-	0.43	1.9	0.28	0.96	0.175	164	-	3,300	0.39	730	1,380	2.44	34.9	
Cert Data GXR-4	0.97	2.8	1,640	64.5	102	-	45	6.6	1.63	5.25	0.36	2.6	-	-	0.21	1.6	0.17	6.3	0.79	30.8	-	470	3.2	52	19	22.5	6.2	

3.5: Messwerte des eingetauschten Phosphats bzw. des phosphataustauschbaren Arsens (Schritt 1.)

<i>Profil</i>	<i>Tiefe (cm)</i>	<i>Horizont</i>	<i>einget. PO₄ in mmol/kg bez. TS</i>	<i>AsO₄ mmol/kg bez. auf TS</i>
HH1-1	-18	Ah	517	1,474
HH1-2	-26	Ah-Go	546	3,478
HH1-3	-43	nHv	842	0,403
HH1-4	-55	nHw	562	0,241
HH1-5	-80	Gcr1	133	0,064
HH1-6	-100 ⁺	Gcr2	102	0,030
HH2-1	-15	Ah	242	0,217
HH2-2	-34	nHv	842	0,199
HH2-3	-47	Gor	132	0,013
HH2-4	-100 ⁺	Gcr	82,7	0,008
HH3-1	-13	nHvm	901	0,313
HH3-2	-25	nHcv	671	0,237
HH3-3	-48	eHw	318	0,055
HH3-4	-78 ⁺	Gcr	152	0,008

3.6: Durch Austausch mit AsO₄ und oder Rücklösung von Phosphatfällungen des aus dem Boden freigesetzten PO₄ und eingetauschte Arsenmengen (Schritt 2.)

<i>Profil</i>	<i>Tiefe (cm)</i>	<i>Horizont</i>	<i>PO₄ in mmol/kg bez. auf TS</i>	<i>einget. AsO₄ mmol/kg bez. TS</i>
HH1-1	-18	Ah	422	208
HH1-2	-26	Ah-Go	549	142
HH1-3	-43	nHv	763	318
HH1-4	-55	nHw	558	134
HH1-5	-80	Gcr1	105	87,1
HH1-6	-100 ⁺	Gcr2	88,9	90,5
HH2-1	-15	Ah	257	235
HH2-2	-34	nHv	724	313
HH2-3	-47	Gor	135	97,2
HH2-4	-100 ⁺	Gcr	77,8	38,6
HH3-1	-13	nHvm	915	335
HH3-2	-25	nHcv	669	438
HH3-3	-48	eHw	240	390
HH3-4	-78 ⁺	Gcr	46,2	106

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie Zitate kenntlich gemacht habe.

Ich habe die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form keinem anderen Prüfungsausschuss vorgelegt.

Ort, Datum

Unterschrift