

Dagmar HAASE, Leipzig

## **Geoökologische Ansätze und Methoden zu Fragen des Umweltmonitoring und zur Umweltbewertung in den mitteldeutschen Weiße-Elster-Pleiße-Auenwäldern bei Leipzig<sup>1</sup>**

### **Summary**

This paper deals with the soil characteristics and soil ecological processes in Fluvisols of hardwood floodplain forests in Saxony. Floodplains and their forests are important elements of the European cultural landscape and they are vital retention areas for flora and fauna that are in danger of becoming extinct.

The Fluvisols of the rivers “Weiße Elster” and “Pleiße” are characterised by seasonal hydrological dynamics and a dense hardwood tree stand. In the last century the hydrological system of the floodplains has been influenced intensively by man in the form of the embankments of the riversides, the agricultural utilisation and the melioration of the wetland areas and soils. In this paper the retention function of the soils (accumulating and fixing airborne and fluviially transported nutrients and contaminants) is investigated by means of different geo-chemical and geo-ecological approaches and methods.

It will be shown that the pH-value of the soil body, as one characteristic element of the ecological functionality in floodplain forest ecosystems, forms a spatial pattern around the trees. Moreover, the stemflow was found to be an important input source for inorganic and organic (DOC) acids regarding the soil humic layers.

### **1 Einführung**

Der vorliegende Artikel versteht sich als ein Beitrag zur Wald- und Auenforschung am Untersuchungsgegenstand der Leipziger Auenwälder. Da die Auen als Erholungsraum für die Leipziger Stadtbevölkerung dienen und als

---

<sup>1</sup> Für die Unterstützung der Arbeiten sei dem Institut für Geographie der Universität Leipzig, der Studienstiftung des deutschen Volkes sowie für die Unterstützung bei der Arbeit an der Station im Pleißeauenwald dem Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle, der Sektion Hydrogeologie Halle, herzlich gedankt.

Stadtforsten bis 1990 auch ökonomisch genutzt wurden (v.a. Holzproduktion), sind ihre natürlichen Potenziale begrenzt. Diese zu erfassen, zu bewerten und insbesondere die Tragfähigkeit der Auen, ihrer Böden und Gewässer, gegenüber Stoffeinträgen quantitativ und qualitativ abzubilden sowie Stoffausträge aus den Böden zu prognostizieren, war Ziel der dargelegten Forschungsarbeiten.

Die Untersuchungen in den südlichen Flussauenbereichen Leipzigs an den Flussläufen der Weißen Elster und Pleiße (Abb. 1) befaßten sich mit der Stoffdynamik und Stofftransportprozessen in den flächig ausgeprägten Stieleichen-Hainbuchen-Eschen-Wäldern, welche zu den artenreichsten Europas und den letzten ihrer Art in Deutschland zählen. Die Leipziger Flussauen haben landschaftlich europäische Bedeutung, denn derartige, in eine Großstadt integrierte, sehr arten- und walddreiche Auen sind in Mitteleuropa fast einzigartig. Die Böden und die Vegetation besitzen im Landschaftshaushalt dieser Auenbiotope eine entscheidende Retentionsfunktion, welche systemerhaltend und systemsteuernd zugleich ist. Daher standen insbesondere die Wechselbeziehungen zwischen Waldbestand (Forst, Erholungsnutzung), Sediment, Wasser und Boden im Mittelpunkt des hier vorgestellten Forschungsprogrammes.

Infolge von Stoffeinträgen, v.a. durch den Luftpfad aber auch in Form von fluvialer Sedimentation, kann das Rückhalte- oder Filtervermögen der Böden negativ beeinflußt werden. Dem Stoffeintrag, Nähr- und Schadstoffgehalten in Freiland-, Bestandsniederschlag, den Stammabflüssen sowie möglichen Transferpfaden in die Böden sollen daher im folgenden besondere Beachtung geschenkt werden.

Des weiteren kommt der geoökologischen Aufnahme und Analyse von Stoffgehalten in Waldbestand und Waldboden der Auen sehr große Bedeutung zu, denn Vegetation, Humusschicht, Gewässer und Boden können gleichzeitig Senke und Quelle für natürliche und anthropogene (Schad-)Stoffe darstellen, so dass Fragen der Stoff-(Re)Mobilisierung bzw. Fixierung als essentiell für die zukünftige Entwicklung und Nutzung der Leipziger Auen sowie ihrer Wälder angesehen werden müssen.

## **2 Zur kulturlandschaftlichen Entwicklung und aktuellen stofflichen Belastung**

Im Gebiet der heutigen Großstadt Leipzig in der gleichnamigen Leipziger Tieflandsbucht vereinen sich die Flussauen der Weißen Elster, der Pleiße, Luppe und der Parthe. Durch die frühe Besiedlung der Lößgebiete südlich von Leipzig seit ca. 6000 v.Chr., die damit verbundene Rodung der dortigen Wälder und eine beginnende ackerbauliche Nutzung oder holozäne Kli-

maschwankungen (FUHRMANN 1999) entstand durch Erosion mit korrelater Sedimentation im heutigen Auengebiet über pleistozänen und holozänen Schottern eine bis zu vier Meter mächtige rötlich-braune Auelehmdecke (tonig-schluffiges Sediment). Bis Mitte der 30er Jahre erfolgte dieser Prozess relativ kontinuierlich (GUTTE u. SICKERT 1998). Auf dem lehmigen Sediment entwickelte sich eine überaus artenreiche Hartholzaue mit Eiche, Ulme, Hainbuche, Ahorn und Esche, welche auch von der Forstwirtschaft (seit dem 16. Jahrhundert) gefördert wurde. Die Entstehung trockenerer Standortbedingungen machte die Entwicklung einer außerordentlich artenreichen Hartholzaue über das Stadium der Weichholzaue hinweg möglich. Der Weiße Elster-Pleiße-Auwald (*Quercus-Ulmetum* bzw. *Carpinetum*), zu welchem auch die Südliche Leipziger Aue als Untersuchungsraum gehört, erhält pflanzengeographisch noch den Zusatz *allietosum* für den dort faziesbildenden Bärenlauch (*Allium ursinum*).

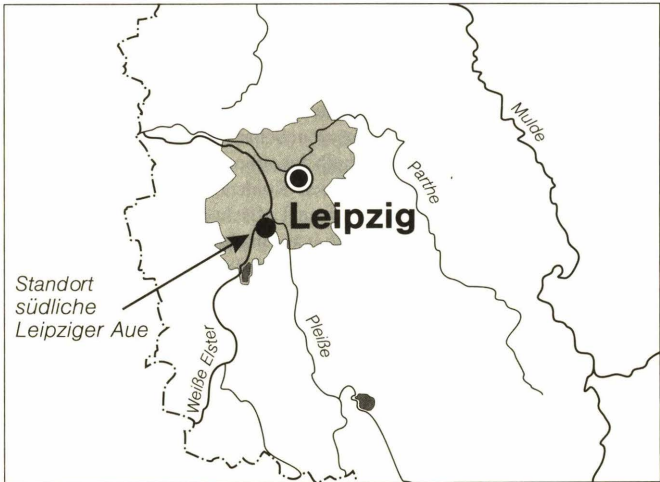


Abb. 1: Lage des Untersuchungsgebietes sowie des Dauerbeobachtungsstandortes (●)

Im Mittelalter erfolgte die Einbeziehung der Auen in die mitteldeutsche agrarisch, hier auch schon städtisch geprägte Kulturlandschaft. Schon Ende des 18. Jahrhunderts gab es in den Leipziger Auen neben diversen Wasserläufen und Standgewässern, Wald, Wiesen, erste Ackerflächen, Gärten,

Parks mit Schlössern und Gütern sowie Verkehrswege. In den Auenwäldern selbst erfolgte ein intensiver Lehmabbau (heutige Lachen) sowie gleichzeitig die Entwässerung von Teilen der Auen für die ackerbauliche Nutzung (Gräben, welche bis heute erhalten sind). Da die festen Siedlungen, wie auf historischen Karten von z.B. 1776 zu erkennen (REHM 1996), zumeist nicht in den Auen selbst, sondern auf dem Rand der pleistozänen Hochflächen zu beiden Seiten der Talung lagen, gibt es wenig historische Hinweise auf größere Hochwässer. Durch zahlreiche Flussbaumaßnahmen gestaltete man die Auen zu einem Raum, in welchem ein buntes Mosaik von Nutzungsarten und baulichen Kulturgütern vorliegt. Ackerflächen, Wiesen, Parks, Siedlungs- und Gartenflächen, Verkehrswege drängten den Auenwald immer mehr zurück. Neben kleineren Arealen, welche der Schutzkategorie „Naturschutzgebiet“ (NSG) angehören, wie z.B. das künstliche Flutungsgebiet an der Paußnitz im Süden, der Bienitz im Westen der Stadt oder die Burgau im Norden Leipzigs, sind die übrigen Teile des Auenwaldes in einem Landschaftsschutzgebiet (LSG) zusammengefaßt (u.a. BERKEMEIER u. LOOSE 1997).

Durch die Nähe zur Großstadt Leipzig mit ihren Emittenten, darunter in erster Linie Industrie und Braunkohlentagebau, Verkehr und kommunaler Hausbrand, sind die Auen darüber hinaus seit Beginn der Industrialisierung durch einen kontinuierlichen Input von Schadstoffen in Diversität und Funktionalität beeinträchtigt. Innerhalb der atmosphärischen Belastung der Auenbereiche in Leipzig spielen neben Kohlendioxid und bodennahem Ozon, Schwermetallen und organischen Luftschadstoffen vor allem die Säuren und säurebildende Emissionen (v.a. zunehmend  $\text{NO}_x$ ; LfUG 1997a, LfUG 1997b, LfUG 1998) eine große Rolle. Während durch Heizungs- und Kraftwerksstilllegungen ein Rückgang der  $\text{SO}_x$ -Emissionen festzustellen ist, kann gerade bei Stickoxiden ein Anstieg seit 1990 im Raum Leipzig ermittelt werden. Eine drastische Senkung der Niederschlags-pH-Werte auf 4,6 (1994) bzw. 4,8 (1996) wird in den Jahresberichten zur Immissionssituation des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie (LfUG) angegeben. Nach 1998 ist keine weitere Absenkung zu verzeichnen (HAASE 1999).

Besonders im Winter zeigen Schneeniederschläge sehr niedrige pH-Werte, zuweilen noch Tage nach ihrer Deposition. PRESS u. SIEVER (1995) geben für stark saure Niederschläge in industriellen Verdichtungsräumen pH-Werte von <4,7 an. Mäßig saure Niederschläge bezeichnen sie von pH 4,7 bis 5,0. In diesen Bereichen liegen die derzeitigen pH-Werte der Leipziger Niederschläge. Der Grund für diese pH-Wert-Abnahme der Niederschläge ist in der allgemeinen Immissionssituation im Leipziger Raum zu suchen. Zwei wesentliche Prozesse spielen hierbei eine Rolle:

- Die anthropogene Emission von Säuren und Säurebildnern und sauren Gasen (WILD 1995) wie z.B.  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{NO}_x$  sowie  $\text{H}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  und  $\text{HCl}$ . Wesentliche Quelle ist dabei die Verbrennung fossiler Energieträger in Kraftwerken und Hausbrand (Energieerzeugung) und der Verkehr, für die  $\text{NO}_x$  darüber hinaus auch der verstärkte Einsatz von Erdgas (MARQUARDT u. BRÜGGEMANN 1998).
- Die Reduktion von neutralisierenden Kationen in Form von Schwebstaub (im Leipziger Raum in Form von  $\text{CaO}$ ,  $\text{CaSO}_4$  und  $\text{MgO}$  als Bestandteile der Braunkohlenflugaschen; u.a. SCHÜÜRMAN 1996). Dabei spielt nicht nur der absolute Rückgang der Flugaschen, sondern auch die verbesserte Abluftfilterung eine wichtige Rolle, da besonders die grobkörnigeren calciumhaltigen Emissionen Säuren im Niederschlag effizienter neutralisieren als jene in Aerosolgröße (SML 1997). Der Rückgang von alkalisch wirkendem Schwebstaub erfolgte zeitlich gesehen rascher als der Rückgang von v.a. Sulfatverbindungen. So sind „pH-Einbrüche“ der Niederschläge 1993–94 zu erklären. Während in Sachsen die Sulfatkonzentrationen der Niederschläge seit 1990 zurückgehen, ist diese Tendenz bei  $\text{NH}_4^+$ - und  $\text{NO}_3^-$ -Gehalten nicht signifikant feststellbar (u.a. CONRADT et al. 1998). Neben der Veränderung der Inhaltsstoffe der Niederschläge seit 1990 sind auch drastische pH-Wert-Absenkungen in den Wintermonaten erkennbar (HAASE 1999), welche auch von RABEN u. ANDREAE (1998) für die Dauerbeobachtungsfläche Colditz für die Jahre 1994–97 festgestellt wurden.

Da mit der Stilllegung großer Braunkohlenkraftwerke im Südraum Leipzigs sowie dem Rückgang des Anteils kohlebeheizter Wohnungen die basisch wirkenden Elemente der Flugaschen, wie Ca oder Mg, zum größten Teil weggefallen sind, kommt es in den umliegenden Ökosystemen nicht länger zu einer deutlichen Anhebung der pH-Werte. Die Einwirkung der Säuren und Säurebildner erfährt eine geringere zusätzliche Pufferung und die Waldbodenpuffermechanismen (Silicat-, Austausch-, Aluminium- und Eisen-Puffer, BMELF 1994) werden mehr als zuvor zur Säurenneutralisation benötigt.

Insbesondere bei den Niederschlags-pH-Werten drückte sich die atmosphärische Aufbasung in einer deutlichen Erhöhung dieser aus. Ohne den zusätzlichen Schwebstaubinput der Braunkohlenindustrie wäre es vielleicht schon früher zu einer derartigen Absenkung der pH-Werte des Niederschlagswassers gekommen. Bei Pufferreaktionen der Böden kann es zur Lösung und Freisetzung toxischer Metalle kommen, welche über Jahrzehnte hinweg ebenfalls Bestandteile der Braunkohlenflugaschen bzw. der Frachten aus den Einzugsgebieten der Auen waren (z.B. Cd, Cr, Mn, Pb, Zn) und

heute als beträchtlicher Pool in den Böden der Auen als Stoffsenken lagern (SCHÜÜRMAN 1996, HAASE 1996a, 1996b u. 1998). Für große Bereiche der Auenböden existieren bisher keine Meßwerte für Bodenschwermetallgehalte und so konnte das Projekt u.a. dazu beitragen, grundlegende Anhaltspunkte zu Stoffgehalten und deren Bindung im Boden zu erarbeiten (HAASE 1999).

Jahr	pH	el.Lf ( $\mu\text{S/cm}$ )	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>++</sup>	Ca <sup>++</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>
1985 <sup>1</sup>	5,0	80	0,60	0,27	0,67	9,10	1,60	5,00	23,0	4,60
1993	4,36	35,1	0,21	0,13	0,1	0,79	1,42	2,73	5,28	0,52
1994	4,43	30,4	0,46	0,1	0,08	0,92	1,13	2,83	4,46	0,55
	4,59	30,9	0,38	0,16	0,08	0,55	1,41	3,14	4,21	<del>10,98</del>
1996	4,65	30,6	0,31	0,1	0,05	0,46	1,69	3,79	3,76	0,52
<b>1998</b>	<b>4,48</b>	<b>35,6</b>	<b>0,16</b>	<b>0,07</b>	<b>0,08</b>	<b>0,31</b>	<b>1,39</b>	<b>3,76</b>	<b>5,42</b>	<b>1,13</b>
<b>1999</b>	<b>4,52</b>	<b>34,8</b>	<b>0,21</b>	<b>0,09</b>	<b>0,07</b>	<b>0,32</b>	<b>1,45</b>	<b>3,77</b>	<b>4,95</b>	<b>1,35</b>

Tab. 1: Mittelwerte (gewichtet) der Konzentration im Niederschlag in mg/l für die Region Leipzig in den letzten Jahren (Quelle: LfUG 1994–97); <sup>(1)</sup> für 1985: NAGEL et al. 1991; für 1998/99 eigene Messungen der Stoffgehalte des Freilandniederschlages im Connewitzer Holz, Südl. Auenwald, n (samples) = 16.

Den jährlichen Verlaufskurven von säurebildenden Gasen und Schwebstaub kann eine deutliche jahreszeitliche Abhängigkeit entnommen werden. Darüber hinaus wurde innerhalb des Untersuchungszeitraumes eine Verminderung der Schwefeldioxidbelastung festgestellt, welche bei den säurebildenden Stickoxiden nicht erkennbar ist.

### 3 Zielstellungen eines Umweltmonitorings in den Auenwäldern

Dem Ziel, räumlich- und prozessorientierte Aspekte des Säurestatus sowie die Pufferfunktion der Auwaldböden in Abhängigkeit von Immissions-situation und Deposition zu erklären und eine Gefahrenabschätzung hinsichtlich des Boden- und Grundwasserschutzes in diesen Auenbereichen vornehmen sowie vom Naturschutz als „Auennutzer“ initiierte Renaturierungsversuche erstmalig unter bodenchemischem Aspekt bewerten zu

können, standen insbesondere die Analyse der initiierten Bodenprozesse durch die oberflächliche Überflutung bzw. Überstauung an der Paußnitz im Südlichen Elsterauenwald bei den Forschungsarbeiten im Vordergrund.

- Da bisher über die Erfassung und den Prozeß der Säureeinwirkung im Objektbereich Niederschläge-Auenwaldökosystem (quantitativ und qualitativ) wenig bekannt ist und in den Auenwäldern Leipzigs keine Dauerbeobachtungs- oder Monitoringfläche für derartige Untersuchungen existieren, seit 1995 aber in den sächsischen Immissionsberichten von einer Versauerung der Niederschläge im Raum Leipzig die Rede ist, war es eine der dringlichsten Aufgabenstellungen innerhalb des Forschungsprojektes, dieser Fragestellung nachzugehen.

Methodisch verlangte eine solche Aufgabenstellung neuartige Meßprogramme (NEUMEISTER et al. 1997), welche dem der zeitlich-räumlichen Dimension von Stoffumsatzprozessen in einer Auenlandschaft gerecht wird. Da besonders Säureeinwirkungsprozesse in Waldböden von Niederschlagsereignissen abhängig und daher zeitlich determiniert sind, war eine Meßanordnung für die Bodenacidität zu entwickeln und einzusetzen, welches möglichst in-situ erfolgen kann, um die aktuelle Reaktion der Auenböden auf die saurer werdenden Niederschläge zu bestimmen.

- Darüber hinaus gehörte es zu den Aufgabenstellungen des Projektes, Stoffeintragspfade in den Auenwäldern zu erfassen, ihre „Wirksamkeit“ bis in die Boden- und Grundwasserzone zu verfolgen, um so An- bzw. Abreicherungsprozesse in Böden und Gewässern nachzuweisen, welche zu Gefahrenpotenzialen für Nutzer wie z.B. Kleingärtner werden können.

Neben der Ermittlung von Boden-pH-Werten wurden daher an einem Dauerbeobachtungsstandort in der Pleißeau Freiland- und Bestandsniederschläge, Stammabfluß- und Bodenlösungsanalysen in Monitoringform über 18 Monate analysiert. Begleitend wurde das Bestandsklima am Standort aufgezeichnet (mittels Datalogger). Diese Datengrundlagen bilden die Basis für die Ergebnisse und ihre Interpretation.

Darüber hinaus werden seit 1993 im Naturschutzgebiet „Die Probstei“ nahe des Weiße-Elster-Hochflutbettes Renaturierungsmaßnahmen in den Auenwäldern dergestalt durchgeführt, dass im Frühjahr für 3–4 Wochen der Zufluß des kleinen, aueninternen Vorfluters Paußnitz in das Hochflutbett geschlossen wird und es somit zu einer ca. 10–20cm hohen flächigen Überstauung der Waldbodenfläche im Bereich des angrenzenden Auenwaldes kommt (ca. 5ha). Ziel dieses Projektes der Stadt Leipzig ist es, ehemalige, natürliche Überflutungen in den Auen zu simulieren und Folgewirkungen für die Auenvegetation und Fauna zu untersuchen.

- Da das städtische Untersuchungsprogramm ausschließlich Flora und Fauna betrachtet, war es Ziel des hier vorgestellten Projektes, zudem die überstauten Böden im Vergleich zu den nicht überstauten sowie auch mögliche oberflächlich verlagerte Sedimente im Überflutungsgebiet auf Nähr- und Schadstoffgehalte (v.a. Schwermetalle) zu untersuchen.

Um den Eintrag in die gefluteten Auenbereiche an der Paußnitz und somit den mit der Renaturierungsmaßnahme verbundenen Stoffeintrag quantifizieren zu können, wurden die frischen Paußnitzsedimente, welche sich während der Überstauung abgelagerten, entnommen und analysiert.

Da ein Eintrag an Säuren und Säurebildnern in Böden deren geochemisches Milieu verändert und Pufferreaktionen initiiert, müssen Untersuchungen zur Stoffdynamik und Stoffmobilität auch Experimente zum Mobilisierungspotenzial in den Böden und Sedimenten enthalten.

- Mögliche ökologische Folgewirkungen von Versauerung bzw. Alkalinisierung der Niederschläge wurden demzufolge in Titrationsexperimenten sowie sequentiellen Extraktionen einzelner Bodenschichten (HAASE 1999) untersucht.

Neben der Erfassung und Bewertung von Absolutstoffgehalten bestand des weiteren ein Ziel der Untersuchungen in der Auswahl geeigneter Leitparameter, welche die Stoffdynamik in solchen Hartholzauenwäldern beschreiben und dabei regionale Hintergrundwerte berücksichtigen. Denn nur so kann eine geographisch sinnvolle Extrapolation punktuell gewonnener Daten für größere Auenbereiche durchgeführt werden.

#### **4 Geoökologische Methoden zur Erfassung der stofflichen Belastung in den Auen**

Waldbodenuntersuchungen wie die Bundesweite Bodenzustandserhebung im Wald (BMELF <sup>2</sup>1994) oder auch das Monitoring-Programm der Dauerbeobachtungsflächen (DBF) stellen für die Bodenuntersuchung eine Profilgrube bzw. Saugkerzen in den Mittelpunkt und davon ausgehend werden dann in alle Himmelsrichtungen aus Oberboden-pH-Werte (beispielweise) ermittelt sowie Mischproben (in Beutelform) entnommen. Darüber hinaus werden auf den Monitoringstandorten des DBF-Programmes Bulksammlerproben, Kronentraufe und Bodenlösung erfaßt. Der direkte Zusammenhang zwischen Bestand, Stammabfluß (welcher bei Laubbäumen große Teile des Gesamtniederschlages ausmacht, vgl. Abb. 2) und Bodenazidität bzw. Pufferverhalten kann auf diese Weise nicht hergestellt werden.



Daher wurde am Institut für Geographie der Leipziger Universität ein Meßprogramm entwickelt (NEUMEISTER et al. 1997, HAASE 1999), mit welchem es möglich wurde, in-situ Bodenazidität in Form des pH-Wertes in einem Meßnetz zu bestimmen, welches sich nicht an den Boden- oder Sedimenteigenschaften, sondern nach der räumlichen Baumverteilung im Waldbestand orientiert (Abb. 2).

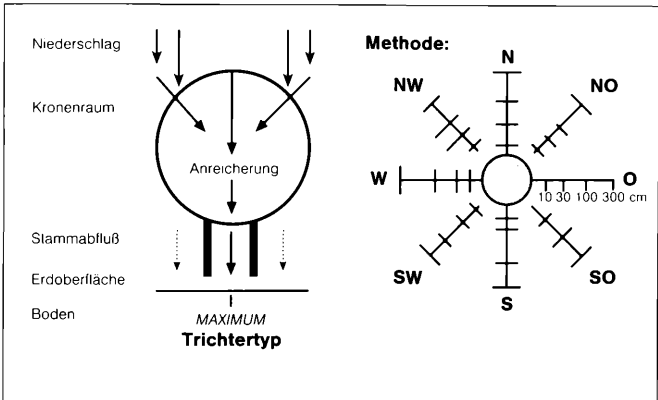


Abb.2: Methodische Herleitung des Messprogrammes für Oberboden-pH-Werte unter Waldbestand in der Leipziger Pleißeau (Trichtertyp nach OTTO 1994)

Darüber hinaus kann durch eine in-situ Messung die hochvariable Größe pH-Wert, welche ja Ausdruck der Gleichgewichtsreaktionen zwischen Lösungs- und Fällungsprozessen im Bodenkörper ist, entschieden besser abgebildet werden. Im Prinzip kann der Einfluss jedes Regenereignisses erfasst werden (HAASE 1999).

Neben dem pH-Wert wurden weitere Indikatoren gesucht, mittels derer sich die Stoffdynamik in den Weiße Elster-Pleiße-Auenwäldern hinreichend beschreiben läßt. Dazu wurde eine Dauerbeobachtungsfläche genutzt, welche sich in unmittelbarer Nähe zu einem der in-situ-Meßstandorte befindet. Hier konnten Freiland- und Bestandsniederschlag, Stammabfluss und Bodenlösung und deren jahreszeitliche Variabilität analysiert werden (Abb. 3 und 4).

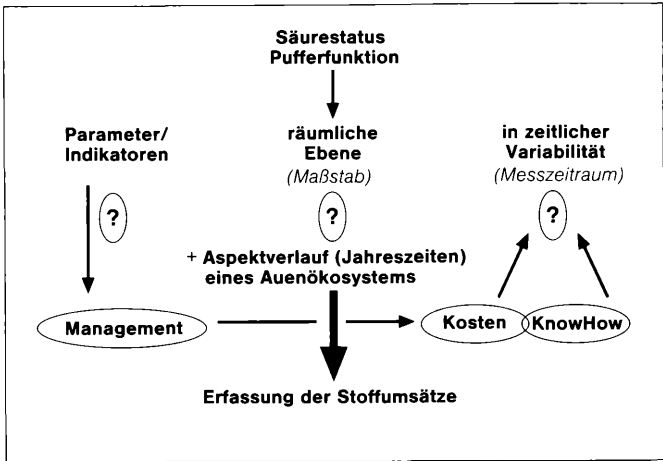


Abb.3: Theoretische Überlegungen zur Bestimmung und Abhängigkeit der Wahl von Leitparametern für die Beschreibung der Stoffdynamik in Auenwäldern

Die An- und Kationengehalte wurden mittels Ionenchromatographie (IC) und AA-Spektroskopie erfaßt. Um die gelösten und partikulär transportierten Stoffgruppen in den wässrigen und festen Medien zu trennen, wurden Stammabflüsse, Gewässer, Sedimente und Böden auf ihre Gehalte an gelöster und nicht gelöster organischer Substanz (DOC, TOC) untersucht. Darüber hinaus wurden in den Umweltmedien Huminsäuren chromatographisch quantifiziert (RP-HPLC; KRÜGER et al. 1998, HAASE 1996b). Die Böden wurden, wie bereits erwähnt, durch ein pH-Titrationsverfahren (in Anlehnung an MEIWES 1984) untersucht sowie sequentielle Bodenextraktionen (ZEIEN u. BRÜMMER 1991) zur Bestimmung der Metallbindungsformen vorgenommen (vgl. Schemata Abb. 5).

Bei der Korrelation der durch Bodenprofilaufnahmen bekannten Bodeneigenschaften mit den ermittelten Stoffgehalten galt es, Beziehungen zwischen bodenphysikalischer und bodenchemischer Ausstattung der Böden und des Waldbestandes der Standorte zu erkennen, welche für Stofftransportprozesse verantwortlich sind. Um nicht durch eine horizontgebundene Probenahme Stoffverteilungskurven, An- und Abreicherungszone a priori zu determinieren, erfolgte die Probenahme in äquidistanten Abständen von 10 Zentimetern.

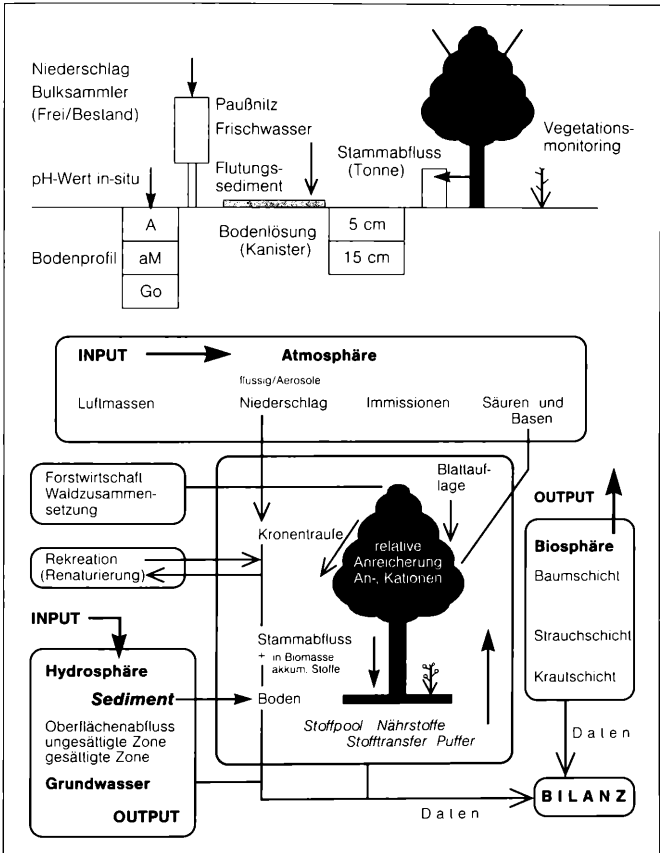


Abb.4: Skizze des Dauerbeobachtungsstandortes und der daraus abgeleiteten Modellentwicklung

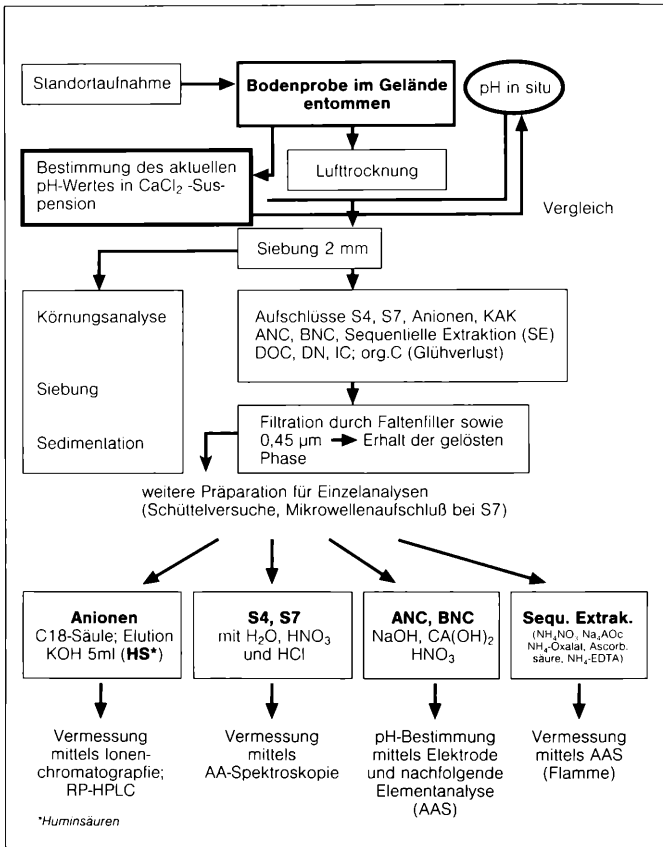


Abb.5: Schema der Probenpräparation für Böden für die laborativen Analysen des Meßprogramms

## 5 Stoffeintrag durch atmosphärische Deposition und Modifizierung der Stoffgehalte durch den Waldbestand

Es konnte im Ergebnis der Untersuchungen nachgewiesen werden, dass für Säurestatus und Stoffbestand der Böden in den Leipziger Auenwäldern Herkunftsraum, Depositionsart und Azidität der Stoffeinträge von entscheidender Bedeutung sind, denn: Es zeigte sich, dass besonders nach sommerlichen Regenfällen (v.a. Landregen über mehrere Stunden bis Tage) der Boden-pH-Wert der erdoberflächennahen Bodenhorizonte unter der Mullauflage nahe der Baumstämme bis auf <3,5 zurückging (Abb. 6 und Abb. 7). Allein diese niedrigen pH-Werte im Oberboden der allgemein als „gut gepuffert“ geltenden Auenlehme sprechen für die Einwirkung saurer werdender Niederschläge (vgl. Kap. 3 Zielstellungen). In größerer Entfernung zum Stamm liegen die Oberboden-pH-Werte während aller vier Jahreszeiten allerdings um 1–2 pH-Stufen höher (HAASE 1999, HAASE et al. 1999a).

Diese Strukturierung der Oberbodenazidität unter Waldbestand in Abhängigkeit von der Entfernung zu kräftigen Baumstämmen konnte mit dem unter Punkt 4. beschriebenen in-situ-Messverfahren erstmalig nachgewiesen werden. Sie legte die Vermutung nahe, dass besonders über den Stammabfluss größere Mengen an anorganischen Säuren in die Böden eingetragen werden, als Resultat der Kronenauskämmung bei Niederschlagsereignissen.

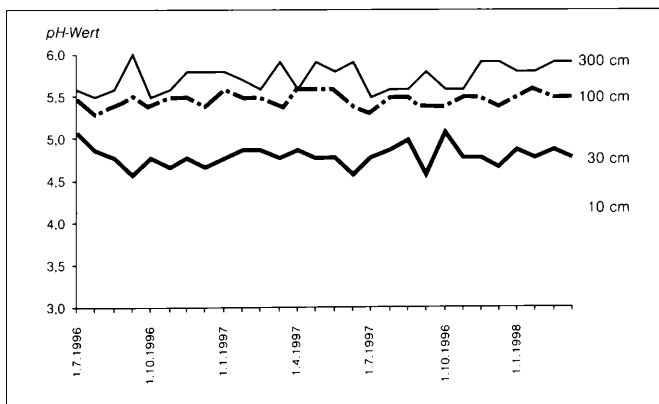


Abb.6: Verlauf der Oberboden-pH-Wertkurven für den Messzeitraum Sommer 1996 bis Winter 1998 für die Messfläche „Der Stempel“ am Dauerbeobachtungsstandort im Pleißeaunwald

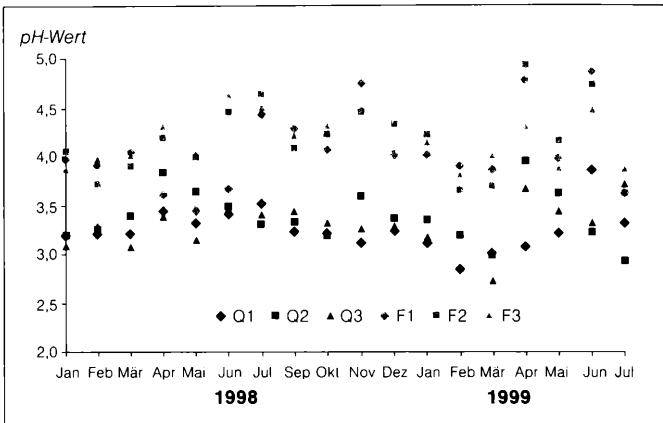


Abb.7: pH-Werte der Stammabflüsse der Arten *Quercus* (Q1-3) und *Fraxinus* (F1-3) im Zeitraum von Januar 1998 bis Juli 1999 (Standort: Pleißeauenwald)

Dies konnte mittels der Untersuchungen am Dauerbeobachtungsstandort im Pleißeauenwald bestätigt werden (Tab. 2). Die pH-Werte der Stammabflüsse der untersuchten Eichen (*Quercus robur*) und Eschen (*Fraxinus excelsior*) zeigten zudem im Frühjahr bis Sommer Werte von bis zu <3,0.

Die Wirkung von Säuren und Säurebildnern aus der Atmosphäre erfolgt demnach über den Waldbestand auf die Böden. Dabei besteht die Spezifik der „Säureeinwirkung“ in ihrer Verteilung durch den Interzeptionsraum (Bestandsniederschlag, Kronendirektaufnahme, Auskämmung, relative Anreicherung durch Interzeptionsverdunstung) und die zentralen Baumstämme (Stammabflüsse).

Die nahezu konzentrische Verteilung bestimmter pH-Werte-Gruppen um die Baumstämme bestätigt diese Aussage. Man kann von pH-Wert-Gradienten in Abhängigkeit vom Stammabstand sprechen, die die Stellen des Eintrittes am Stamm („Protonenpool“) anzeigen und ebenso die Bereiche der Pufferung durch den Boden.

Es ist demzufolge räumlich Verteilungsmuster der pH-Werte in den oberflächennahen Bodenhorizonten erkennen, die als ein Schlüssel zum Verständnis von Säureeinwirkungsprozessen in Waldböden gewertet werden können, da sie die räumliche Funktion der Bodenazidität unter Waldbestand wiedergeben.

Es ist darüber hinaus eine jahreszeitliche Variabilität und Abhängigkeit festzustellen, die zeigt, dass besonders im Frühjahr und Sommer ein Basen-defizit im Oberboden besteht. Des weiteren ist auch eine baumartenspezi-fische Abhängigkeit der Oberboden-pH-Wertemuster erkennbar. Besonders *Acer platanoides* und *Acer campestre* zeigen die geringste Versauerung um die Stämme, was neben der Zusammensetzung und Zersetzungsraten der Streu auch bedeutend von den Protonengehalten in den Stammabflüssen abhängig ist (Tab. 2, Abb. 8).

	<i>pH</i> -Wert	<i>DOC</i> Dissolved Organic Carbon	<i>IC</i> Inorganic Carbon	<i>TC</i> Total Carbon	<i>DIN</i> Dissolved Inorganic Nitrogen
<b>Quercus 1*</b>	3,30	92,71	0	92,71	23,25
<b>Quercus 2</b>	3,52	79,77	0	79,77	21,19
<b>Quercus 3</b>	2,92	206,80	0	206,80	41,36
<b>Fraxinus 1**</b>	3,75	60,88	0	60,88	10,39
<b>Fraxinus 2</b>	3,94	90,81	0	90,81	12,97
<b>Fraxinus 3</b>	4,09	113,60	0	113,60	11,47

Tab. 2: Relevante durchschnittliche Gehalte an C (gelöst) und N (gelöst) sowie die pH-Werte für die Stammabflüsse der Auenwaldarten *Quercus robur* (Stieleiche) und *Fraxinus excelsior* (Esche) im südlichen Leipziger Auenwald (mg/l; arithmetisches Mittel der Jahresgänge Jan. 1998 – Nov. 1999).

Es konnte mittels *Reversed Phase High Performance Liquid Chromatography* gezeigt werden (KRÜGER et al. 1998, HAASE et al. 1999b), dass neben anorganischen Schwefel-, Salpeter- oder Salzsäuren auch organische Säuren aus dem Bestand in die Auenböden eingetragen werden und so zur temporären Versauerung dieser beitragen (Abb. 8). Weiterführende Untersuchungen müssen nun prüfen, wie sich die Bodenreaktion der Fluvisol-Böden (dt. Auen-Vegagley) über einige Jahre hinweg an die gesunkenen Niederschlags-pH-Werte in der Region anpassen wird.

Es wird in Abb. 9 deutlich, dass besonders *Quercus robur* (Q2, Q3) sehr saure Stammabflüsse in den Boden abführt. Hinsichtlich einer zeitlichen Veränderung im Jahresgang gilt für alle untersuchten Bäume darüber hinaus, dass besonders im Winter sehr niedrige Stammabfluss-pH-Werte erreicht werden. Hohe Sulfatgehalte im Stammabfluss und von diesem beeinflusster Bodenlösung zeigten sich im Herbst/Winter 1998/99 sowie 1999/2000. Schon im Jahr 1997/98 waren diese in der Bodenlösung vergleichbar hoch (Abb. 9, Tab. 3). Gleichzeitig zeigten sich auch in den

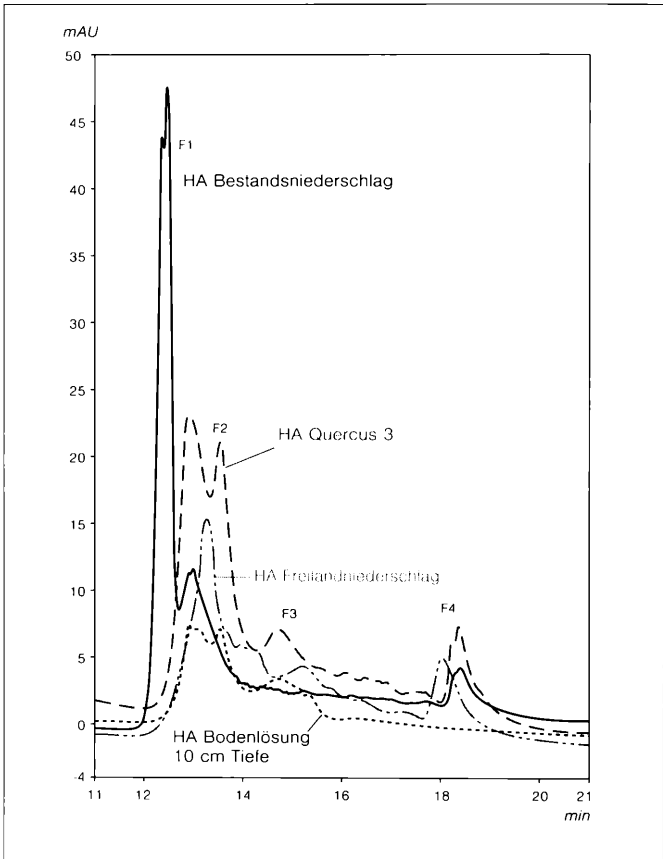


Abb.8: Anteile an Huminsäuren (HA) in Stammabfluss und Bodenlösung am Dauerbeobachtungsstandort im Pleißeauenwald (Y-Achse: Extinktion im UV-VIS-Spektralbereich; Flusszeit des Chromatogramms 21 min)



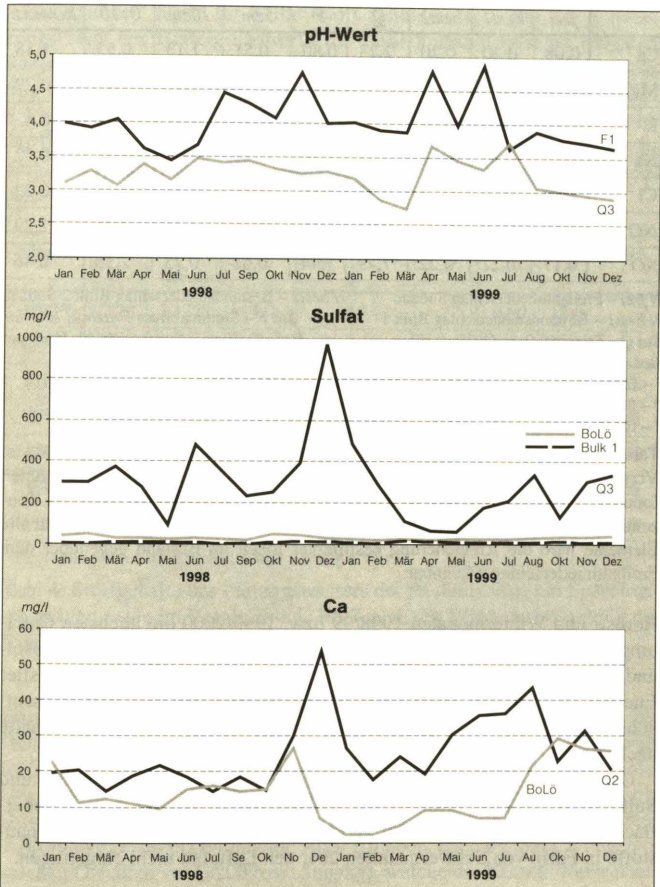


Abb.9: Vergleich der Azidität, Sulfat- und Calciumgehalte verschiedener Ökosystemkomponenten am Dauerbeobachtungsstandort in der Leipziger Pleißeau von Januar 1998 bis Dezember 1999 (Stammabflüsse zweier Eichen, Q1 und Q2, und einer Bodenlösung, BoLö in 10cm Bodentiefe; Datenquelle: Haase 1999)

	<i>N frei</i>	<i>N best1</i>	<i>N best2</i>	<i>Sta Q</i>	<i>Sta F</i>	<i>BoLö<sup>2</sup> 5cm</i>	<i>BoLö 10cm</i>	<i>BoSu<sup>4</sup> 0-10</i>	<i>Bsp.<sup>1</sup> ROWELL</i>
Ca <sup>2+</sup>	0,08	0,20	0,20	2,23	0,80	0,51	1,13	0,53	1,18
Mg <sup>2+</sup>	0,02	0,07	0,07	0,31	0,22	0,32	0,27	2,42	0,29
K <sup>+</sup>	0,01	0,10	0,11	1,18	1,95	0,97	0,21	0,73	0,85
Na <sup>+</sup>	0,06	0,14	0,12	1,12	1,46	0,21	0,06	1,33	0,52
Cl <sup>-</sup>	0,09	0,18	0,15	0,97	0,18	0,64	0,53	0,59	0,22
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,04	0,25	0,21	0,96	0,16	0,07	0,24	2,33	2,29
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0,17	0,21	0,22	7,79	1,44	0,61	0,73	2,15	0,46

*N frei* – Freilandniederschlag Südaue

*N best2* – Bestandsniederschlag Bulk 2 Südaue

*N best1* – Bestandsniederschlag Bulk 1

*Sta F* – Stammabfluss *Fraxinus excelsior*

*Sta Q* – Stammabfluss *Quercus robur*

*BoSu 0-10cm* – Suspension Ah-Horizont

*BoLö 5cm/10cm* – Bodenlösung 5/10cm Tiefe

<sup>1</sup> – Gelbbrauner Lehm, Suspension, Neuseeland (ROWELL 1997)

<sup>2</sup> – für Bodenlösung, Angaben in m(eq)/l Boden

<sup>3</sup> – für Bodensuspension, Angaben in m(eq)/l boden

Tab. 3: Ionenäquivalente in mmol/l verschiedener Ökosystemparameter im Wald im Vergleich – das Beispiel Leipziger Pleißeauenwald. Auffällig sind die erhöhten Ionengehalte in den Stammabflüssen, hier kommt es scheinbar zu einer Art Konzentrationseffekt, verbunden mit dem Prozeß der Interzeptionsverdunstung. Für alle Elemente wird die Anreicherung bestimmter Ionen im Bestand gegenüber dem Freilandniederschlag erkennbar.

Herbst- und Wintermonaten 1998/99 bzw. 1999/2000 die höchsten Calciumgehalte, was den Schluss zuläßt, dass es sich um verstärkten Aerosol- und Schwebstaubeintrag aufgrund von Verbrennungsrückständen fossiler Energieträger handelt. Nach der Heizperiode sinken die mittleren Elementgehalte wieder ab, seit April 2000 ist ein leichter Anstieg der Ca-Gehalte nachweisbar.

Obwohl man in Tabelle 3 eine Anreicherung von Ca, Mg, Nitrat und Sulfat im Bestandniederschlag und den Stammabflüssen bis in die erdoberflächennahe Bodenlösung (fett gedruckt) erkennen kann, werden Schadstoffe in Form von Schwermetallen über den Luftpfad nicht eingetragen.

## 6 Stoffeintrag durch Fluss- und Flutungssedimente

Anders stellen sich die Ergebnisse der Untersuchungen zum Stoffeintrag durch Fluss- und Flutungssedimente dar: durch das Flutungswasser des aueninternen Vorfluters Paußnitz im in Kapitel 3 angesprochenen Renaturierungsgebiet kommt es nicht zu einem deutlichen Eintrag von Schad-

stoffen (Tab. 4). Die gegenüber Literaturdaten (vgl. SIGG u. STUMM 1996) leicht erhöhten Werte für Sulfat und Calcium entsprechen der Schwankungsbreite der Hintergrundwerte für diese Verbindungen im Leipziger Raum (durch Braunkohlenflugaschen, Tagebaue etc.). Wenn ein Stoffeintrag vorliegt, so geschieht dieser durch die Auflage einer sehr dünnen Schicht des schluffig-tonigen Paußnitzsedimentes, welches im Frühjahr bei der Überflutung/Überstauung abgelagert wird, obwohl die künstliche Flutung im Renaturierungsgebiet an der Paußnitz mit Frischwasser vorgenommen wird.

Monat	pH	el. Lf ( $\mu\text{S/cm}$ )	DOC	Ca	Mg	Al	Pb	NO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>
5/93*	7,28	1371	4,0				0,09	17,0	
6/93*	7,05	1107	5,6				0,07	15,0	
11/96	6,98	1037	36,6	89,9	24,2	0,48	0,04	31,5	456
3/97	7,17	1098	41,3	98,5	26,5	0,55	0	26,9	443
6/97	7,21	1109	50,6	75,6	25,3	0,61	0,02	25,5	396
9/97	7,15	1025	39,9	69,8	24,1	0,51	0	30,2	406
11/97	7,26	1175	32,7	82,1	28,5	0,46	0,04	37,9	469

\* Beprobung durch das Umweltinstitut Leipzig e.V.

Tab. 4: Stoffgehalte des Flutungswassers der Paußnitz über ein hydrologisches Jahr sowie im Vergleich mit 1993 nach der Wiederbewässerung der Paußnitz mit Elsterwasser untersuchten Proben (in mg/l)

Darüber hinaus kommt es im Frühjahr trotz Gewässerverbauung bei Hochflut(-wasserstand) der Weißen Elster, der Pleiße und des Floßgrabens im Südlichen Auenwald zur Akkumulation schluffiger-sandiger Sedimente. Die Gesamtschwermetallgehalte, welche mit diesen Sedimenten auf die flussnahen Auenflächen eingetragen werden, sind für Zn (Elster 1.100mg/kg; Paußnitz 640mg/kg; Abb. 10) hoch, auch Pb und Cd liegen in solchen Gehalten vor (>200 bzw. 5mg/kg), welche die KLOKE-Werte überschreiten (SCHNEIDER et al. 1999).

Durch sequentielle Extraktion (ZEIEN u. BRÜMMER 1991) der Sedimentproben konnte nachgewiesen werden, dass für die meisten Metalle die adsorbierten Gehalte mit abnehmender Korngröße steigen (Abb. 11; SCHNEIDER et al. 1999). Abb. 11 kann man ebenfalls entnehmen, dass die hohen Cd- und Zn-Gehalte überwiegend mobil bzw. in austauschbarer,

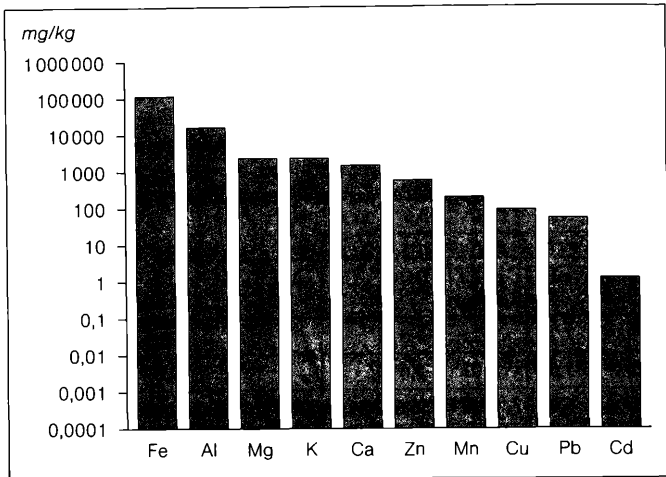


Abb.10: Metallgesamtgehalte des frühjährlichen Paubnitzsedimentes 1998

unspezifisch adsorbierter Form (Fraktionen I-III) vorliegen. Diese Bindungsformen deuten auf anthropogenen Eintrag hin im Gegensatz zu festen Metallbindungen geogener Herkunft (KRÜGER 1995). Die hohen an die OBS (organische Bodensubstanz) sorbierten Metallanteile (Humate; ZIECHMANN et al. 1990) zeigen die mobilisierbaren Metallgehalte bei Änderung des pedochemischen Milieus (z.B. durch pH-Wert-Senkung oder Anhebung).

Das gegebene Mobilisierungspotenzial in den Fluss- und Flutungssedimenten wird auf die Böden der gefluteten Flächen übertragen und stellt somit eine latente Gefahrenquelle (Verlagerung toxischer Stoffe, z.B. Schwermetalle) für Bodenflora sowie Bodenfauna dar. Besonders durch bereits geringfügige Änderungen der geochemischen Milieubedingungen, wie sie beispielsweise durch Niederschläge mit pH-Werten <5,0 initiiert werden, können weniger stark im Oberboden adsorbierte Metallgehalte in tiefere Bodenschichten bzw. das Grundwasser migrieren. Um derartige Prozesse zu prognostizieren, ist es notwendig, die bodenphysikalischen Eigenschaften, welche den Stofftransport (gelöster und partikulär transportierter Phasen) wesentlich beeinflussen, wie der Ton- und Schluffgehalt des Bodens, seine Fähigkeit, periodisch auszutrocknen sowie der Humus-

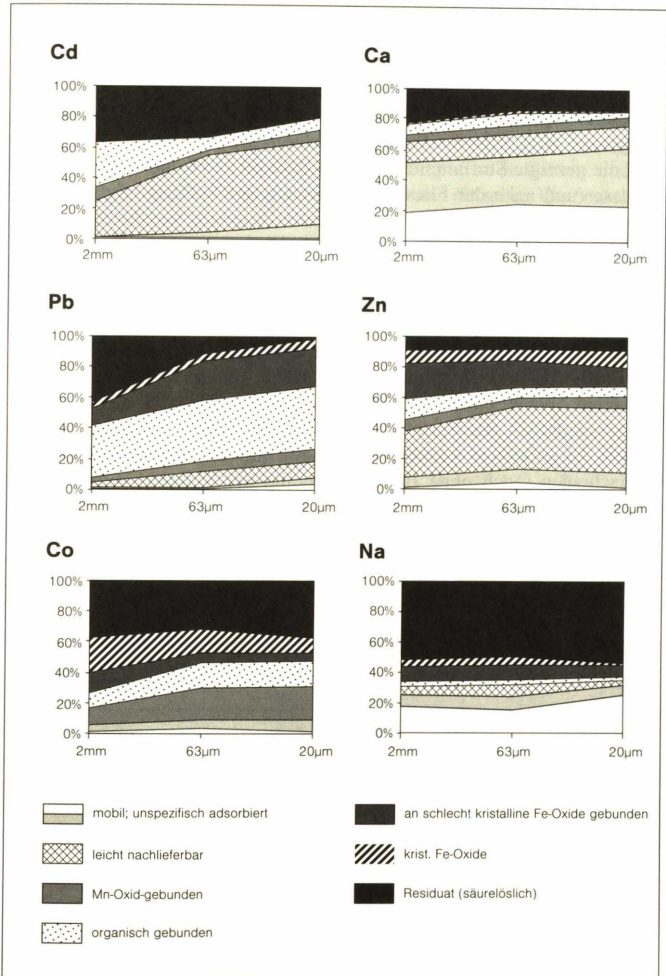


Abb. 11: Bindungsformen ausgewählter Metalle in Abhängigkeit von der Korngröße (im mm bzw.  $\mu\text{m}$ ) des Flutungssediments der Weißen Elster

gehalten, vertikal in den Böden zu erfassen. Dann können Folgewirkungen oberflächlich eingetragener Sedimentstoffgehalte bewertet werden.

## 7 Bewertung der Stoffgehalte und der Stoffdynamik in den Auenböden

Ausgehend vom erfassten Stoffeintrag durch die atmosphärische Deposition, die gezeigte Stoffanreicherung im Bestand sowie die sauren Stammabflüsse (und nahe der Fließgewässer auch durch Fluss- und Flutungssedimente) interessieren im folgenden die Prozesse, welche dadurch im Boden initiiert werden.

Daher werden im folgenden vier Vertikalprofile im Südlichen Leipziger Auenwald näher betrachtet werden, welche sich nahe des Monitoring- bzw. Dauerbeobachtungsstandortes LAS (Lage vgl. auch Abb. 1) befinden und für die daher die in Kapitel 5 erläuterte Depositionssituation relevant ist. Die Profile 01 und 02 befinden sich darüber hinaus in einem künstlich gefluteten Auenabschnitt (vgl. Kapitel Zielstellungen, Abb. 12).

Bodenkundlich interessant ist, dass sich die Profile innerhalb und außerhalb des gefluteten Auenbereiches durch ihre diagnostischen Merkmale unterscheiden (auch ohne Berücksichtigung der Flutungsereignisse seit sieben Jahren). Entscheidend ist dabei ihre Lage zum Damm der Weißen Elster. Es liegt eine leichte Neigung vom Elsterdamm in Richtung der Profile vor, so dass die zwei Profile 01 und 02 im Flutungsgebiet in 50–80 cm Bodentiefe trockener sind (Go) als die zwei Profile (03, 04) im

Profil	1 (Flutungsgebiet)	2 (Flutungsgebiet)	3 (außerhalb Flutungsgebiet)	4 (außerhalb Flutungsgebiet)
<b>organische Auflage</b>	(O) 1-3 cm	(O) 1-4 cm	(O) 1-3 cm	(O) 1-2 cm
<b>A-Horizont</b>	Ah 0-10 cm	Ah 0-10 cm	Ah 0-12 cm	Ah 0-9 cm
<b>M-Horizont</b>	aMGo 10-40 cm	aMGo 10-45 cm	aMGo 12-46 cm	aMGo 9-38 cm
<b>beginnender Grundwasser-einfluss</b> ↓	Go 40-80 cm	Go 45-80 cm	GoGr 46-75 cm	GoGr 38-80 cm
	Gor >80 cm	Gor >80 cm	Gor >75 cm	Gor >80 cm

Abb.12: Profilaufbau und -beschreibung der allochthonen Vegagley-Böden (Profile 1 bis 4)

nichtgefluteten Bereich, da dieser sich weiter vom Elsterdamm entfernt befindet. Die Profile 03 und 04 weisen im Go-Horizont auch Reduktionsmerkmale auf (Mn-Konkretionen, Bleichflecken) und werden daher mit GoGr bezeichnet. Auf die ursprünglich trockeneren Bedingungen des jetzt gefluteten Bereiches weisen u.a. auch die kräftigen Hainbuchen am Standort hin.

Hinsichtlich der Stoffmobilität und Stoffmigration in Böden sind die Tiefenverteilungen und Konzentrationsgradienten einzelner Elemente bzw.

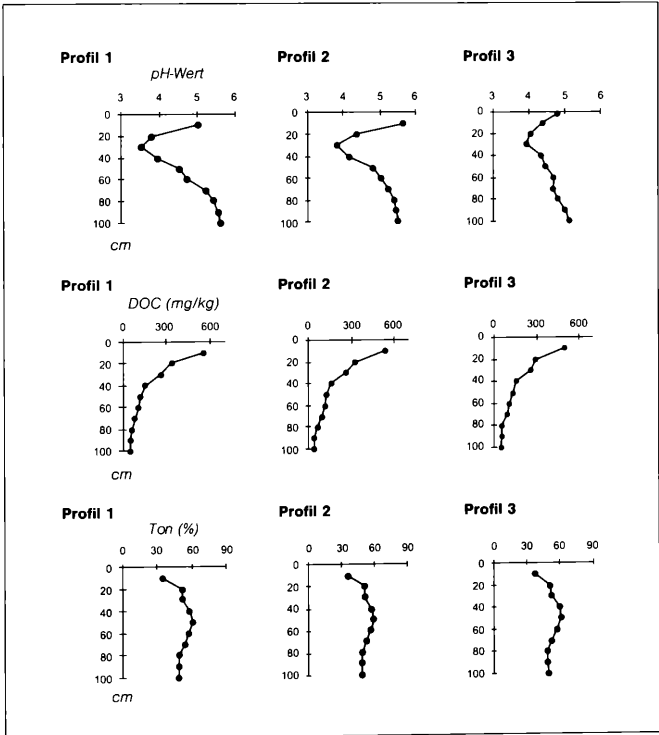


Abb.13: Vertikalgradienten der pH-Werte, der Gehalte an gelöstem organischen Kohlenstoff (DOC = dissolved organic matter) und der Tongehalte dreier Vegagley-Böden im Elster-Pleiße-Auenwald

chemischer Verbindungen von entscheidender Bedeutung. In Kopplung mit den physikochemischen Eigenschaften geben sie Auskunft über die Retentionskapazität des jeweiligen Bodens.

Die Vertikalgradienten der Bodenacidität (pH-Wert) der Tiefenprofile 01–03 zeigen, dass nicht der Oberboden (orgC-Gehalte von >7%), sondern der grundwasserunbeeinflusste Unterboden (aM-Horizont ohne Fe-Ausfällung) in 20–40cm Bodentiefe sehr niedrige pH-Werte aufweist (Abb. 13), welche z.T. im Bereich des Aluminium-Eisen-Pufferbereiches für Böden liegen. Dies bedeutet, dass in diesen Schichten Aluminiumhydroxide ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ), welche an den Adsorberoberflächen gebunden sind, infolge von Neutralisationsreaktionen aufgelöst werden und das toxische  $[\text{Al}^{3+}]$  in die Bodenlösung gelangt. Gleichzeitig sind die sauren Unterbodenbereiche aber von hohen Tongehalten gekennzeichnet (Abb.13).

Da eine Stoffmobilisierung in den Vegagley-Böden durch die sauren Atmosphären- und Bestandseinträge zu erwarten war, und in vorangegange-

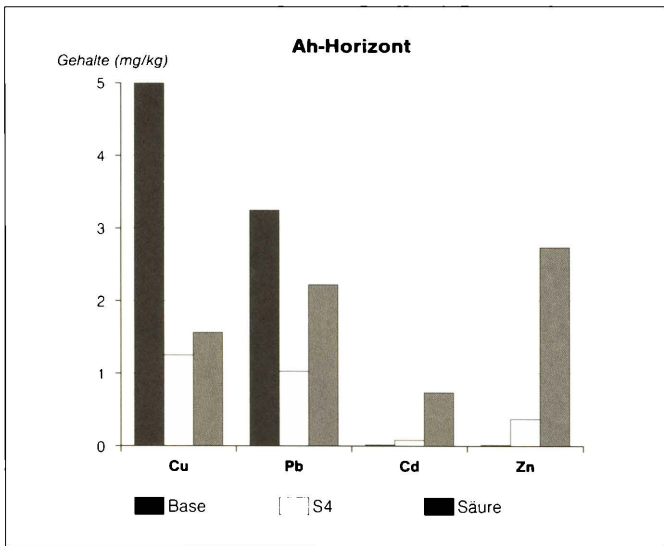


Abb.14: Metallmobilisierung im Oberboden bei der Zugabe definierter Säure- und Basemengen (200 mval) im Vergleich zum wässrigen Eluat (S4)



nen Arbeiten von HAASE (1996, 1998) die Auenböden als Schwermetall-senke innerhalb der Stadtfläche von Leipzig ausgegrenzt werden konnten, wurde diese Element-Gruppe auch hinsichtlich ihrer Mobilisierbarkeit und ihres Bindungsverhaltens im Boden weiter untersucht.

Einen zunehmenden Eintrag saurer Niederschläge simulierende Titrationsversuche zeigten eine prognostizierbare Auswaschung von Alkali- und Erdalkalimetallen (Bodennährstoffen) und Mobilisierung von Schwermetallen aus dem System (HAASE 1999), insbesondere für die Schwermetalle Zink (Zn) und Cadmium (Cd) im Oberboden. Abbildung 14 weist aber auch darauf hin, dass trotz geringer Metallgesamtgehalte insbesondere die Schwermetalle Kupfer und Blei bei basischem Eintrag in der Bodensuspension des humosen Ah-Horizontes erhöht werden. Das spricht für die Mobilisierung von alkalilöslichen Metall-Huminstoff-Komplexen im Bodenkörper.

Diese Aussagen können auch für tiefere Bodenschichten verifiziert werden. In den sauren Unterbodenschichten und dem grundwasserbeeinflussten Bereich zeigen sich trotz anderer Redoxbedingungen (Sauerstoffdefizit bei Grundwasserhochstand, reduzierende Bedingungen) vergleichbare Mobilisierungstendenzen in Abhängigkeit vom Boden-Säurestatus (Abb. 15). Insbesondere das unspezifisch adsorbierte, anthropogen eingetragene Zink wird bei zunehmender Acidität in den Unterbodenschichten (20–40cm) mobilisiert und kann so in tiefere Schichten migrieren. Blei dagegen wird begründet durch seine Affinität zur organischen Bodensubstanz v.a. im Oberboden sowie im sauren Unterboden (20–40cm Bodentiefe) bei pH-Wert-Anstieg mobil.

Auch bei der Betrachtung der Vertikalgradienten des wasserlöslichen und säurelöslichen Aluminiums (Al) sowie den Anreicherungsfaktoren im Bestand könnte man eine Verlagerung des bodenbürtigen Al ins Grundwasser annehmen (Abb. 16). Diese ist aber im Grundwasser, welches im Frühjahr bei Grundwasserspiegel-Hochstand in den Vegagley-Profilen entnommen wurde mit einer Al-Konzentration von 0,23 mg/l nicht nachweisbar. Zieht man die zuvor in Abb. 13 diskutierten Tongehalte der Profile vergleichend heran, so muss vermutet werden, dass die hohe Sorptionskapazität der Tonminerale in den Bodenschichten über den grundwasserbeeinflussten Horizonten (>70cm Bodentiefe) die Al-Migration von den sauren Bodenschichten (20–40cm Bodentiefe) unter den aktuellen Bedingungen noch puffert.

Letztere Aussage bezieht sich auf das Retentionspotential der Auenvegagleyböden. Bereits in Kapitel 2 wurde die Frage nach dem stofflichen Mobilisierungspotential in den Böden und geeigneten Parametern (oder Indikatoren) für dessen Beschreibung gestellt. In Kapitel 4 wurden die dazu

verwendeten Titrations- und Extraktionsverfahren vorgestellt.

Mittels des 7-stufigen Extraktionsverfahrens zur Elution von Metallen nach ZEIN u. BRÜMMER (1991) konnten mit Hilfe der Ermittlung des

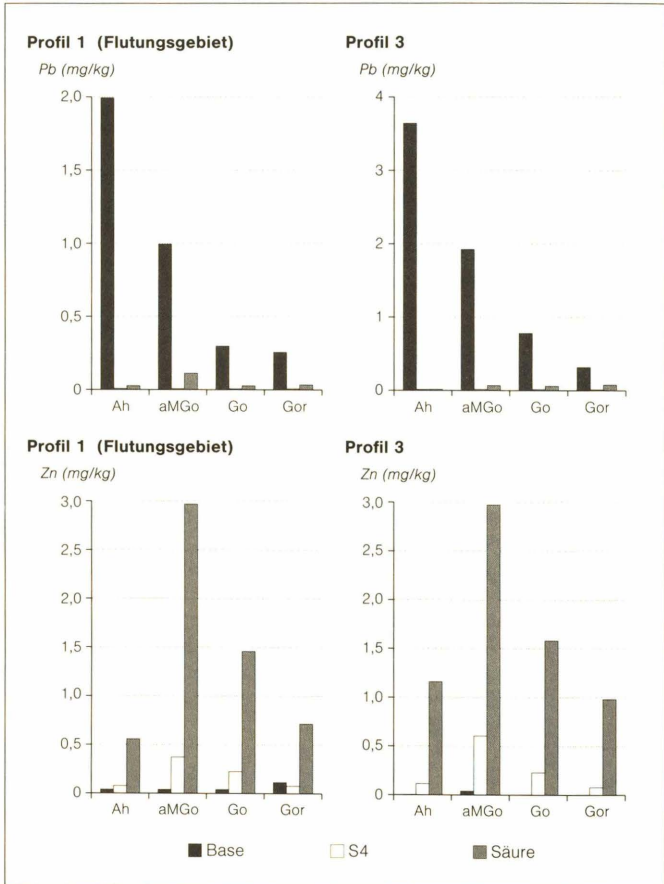


Abb.15: Metallgehalte eines Profils innerhalb (1) und außerhalb (3) der Überflutungsfläche an der Paußnitz unter definierter Säure- und Basenzugabe (200 mval)

prozentualen Anteils vorhandener Bindungsformen ökologisch relevante Aussagen zur Mobilisierbarkeit von Schadstoffen und Nährelementen in den Auenwaldböden getroffen werden (HAASE 1999). Der Versuchsaufbau nach ZEIEN u. BRÜMMER (1991) wurde mittels Säuretitation dahingehend erweitert, dass Aussagen zur Veränderung von Metallbindungsformen bei zunehmendem Säureeintrag möglich wurden (vgl. Methodik Kapitel 4, HAASE 1999).

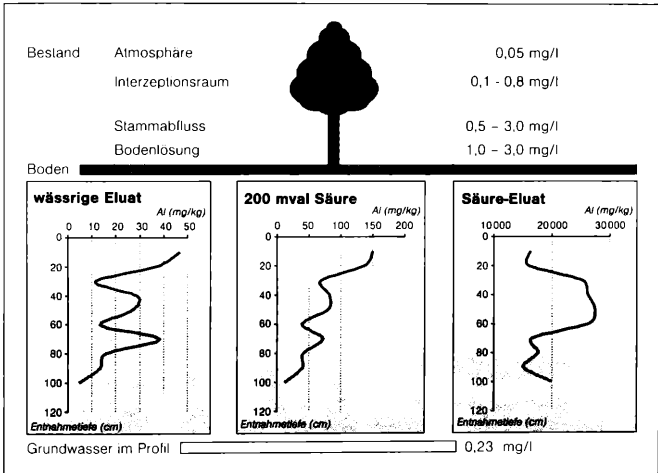


Abb.16: Anreicherung und Pufferung von löslichem Aluminium auf dem Weg von der Atmosphäre über den Waldbestand bis in den Auenboden sowie im Profil entnommenem Grundwasser im Elster-Pleiß-Auenwald

Im Ergebnis zeigen die Abbildungen 17–19, dass aus der Schadstoffgruppe der Schwermetalle Cd in nennenswerten wasser- und  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ -löslichen Anteilen im Boden adsorbiert vorliegt, welche bei Säureinput erhöht werden. Auch für die Schwermetalle Blei (Pb) und Kupfer (Cu) trifft dies im Prinzip zu, obwohl diese Metalle in deutlich geringeren Anteilen nur oberflächlich adsorbiert werden (Abb. 17, 18) und eher eine Affinität zur Bildung metallorganischer Komplexe besitzen. Calcium (Ca) als wichtiger Pflanzennährstoff ist leicht mobilisierbar, da >80% der nachweisbaren Ca-Gehalte in der wasserungesättigten Bodenzone (>70cm Bodentiefe) unspezifisch an der Bodenmatrix adsorbiert vorliegen und daher bereits in der

Fraktion I mit  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  in Lösung gehen. So ist auch davon auszugehen, dass nicht nur im Oberboden nahe der Baumstämme grosse Mengen an Ca ausgewaschen werden, sondern auch in tieferen Bodenschichten und somit nicht mehr als Nährstoff zur Verfügung stehen.

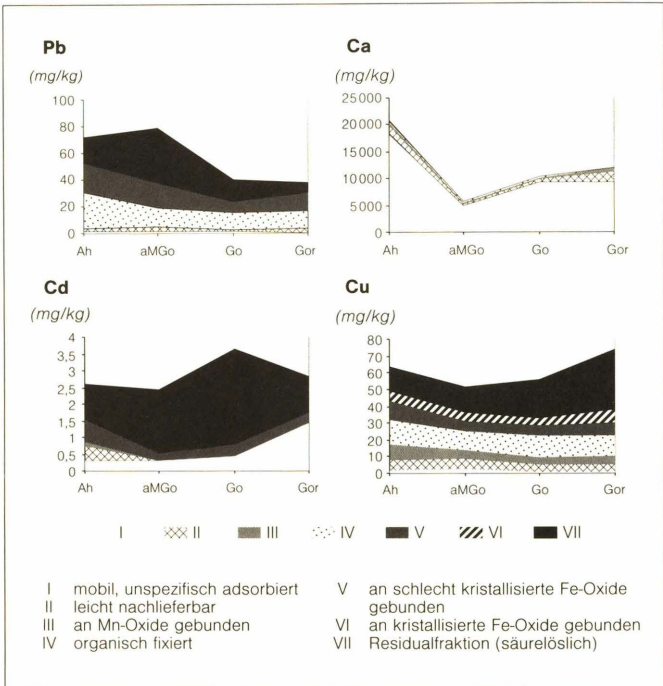


Abb.17: Metallbindungsformen in % in Humus-, aM-, Oxidations- und grundwasserbeeinflusstem Gor-Horizont im Auelehmprofil 1 im künstlichen Überflutungsgebiet an der Paußnitz

Im Ergebnis der Untersuchungen zu Metallbindungsformen und deren Stabilität in den Auenböden kann man schlussfolgern, dass ein fortschreitender Eintrag saurer Niederschläge mit  $\text{pH} < 5,0$  zu einer Veränderung dieser Bindungsformen führen wird, wobei festere Metallbindungen in besser lösliche übergehen (Abb. 19).

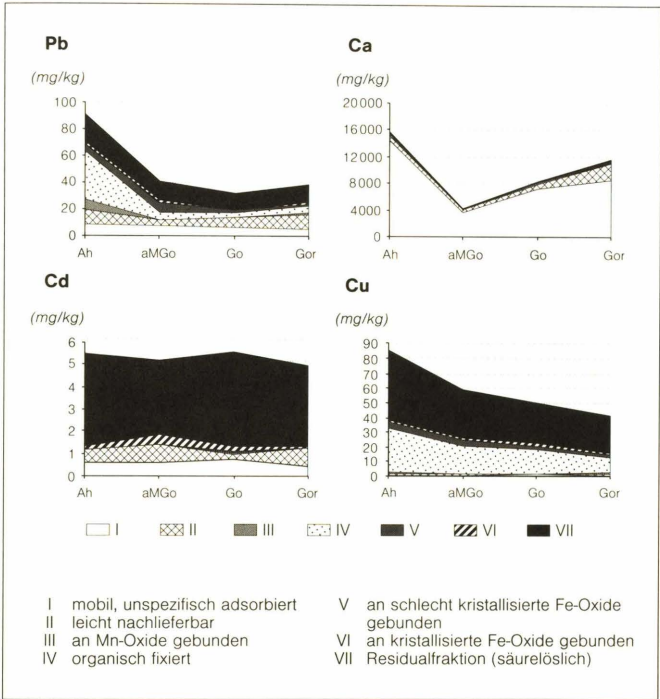


Abb.18: Metallbindungsformen in % in Humus-, aMGo-, frühjahrsnahe Oxidations/Reduktions- und grundwasserbeeinflußtem Gor-Horizont im Auelehmprofil 3 außerhalb des künstlichen Überflutungsgebietes an der Paußnitz

Untersuchungen von POPP et al. (1997) bestätigen die hier erzielten Versuchsergebnisse: in Simulationsreihen für eine bis zu 100jährige saure Deposition auf anthropogen belasteten Böden des Verdichtungsraumes Bitterfeld-Dessau-Wittenberg konnte gezeigt werden, dass für die Schwermetalle Cd und Zn die Anteile an der unspezifisch adsorbierten, mobilen Fraktion I deutlich zunehmen, was als eine potenzielle Mobilisierung und Gefahr für die Böden und Grundwässer zu bewerten ist. Besonders für die Elemente Cd und Zn wird die nachlieferbare, carbonatgebundene Fraktion stärker „erschöpft“, wie auch die Versuchsreihen im Leipziger Auenwald

zeigten. Die von POPP et al. (1997) durchgeführten Untersuchungen eignen sich besonders gut zum Vergleich mit denen in den Leipziger Auen, da auch im Bitterfelder Industriegebiet ein Rückgang der künstlichen Aufbasung der Niederschläge aufgrund von verminderten Flugaschenbestandteilen in der Atmosphäre nachweisbar ist.

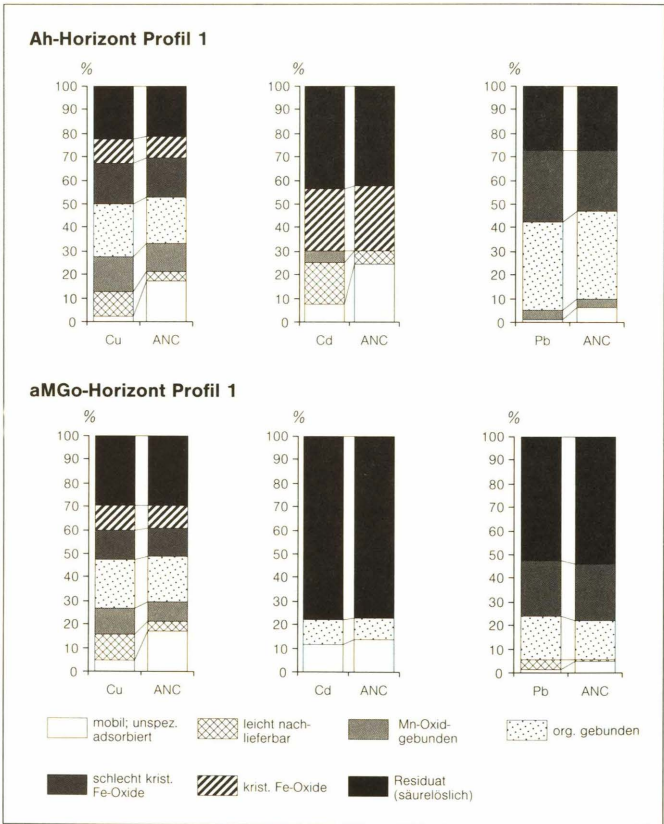


Abb.19: Veränderung der Bindungsformen im humosen Ah-Horizont und aMGo-Horizont des Profils 1 innerhalb des künstlichen Flutungsgebietes verstärktem Säureeintrag (Simulation erfolgte in Anlehnung an die Titrationsexperimente mit 200 mval Basenäquivalent-Zugabe)

## **8 Praktische Anwendung der Ergebnisse in der Umweltplanung und Umweltbeobachtung**

Die hier vorgestellten Ergebnisse der Analyse von Stoffgehalten in Auenwäldern dienen als Voraussetzung und Begründung für ein anzustrebendes Langzeit-Monitoring der Erfassung und Beobachtung von Umwelteinflüssen auf die Auenwälder und v.a. auch die Auenböden, da insbesondere aufgrund der Kosten- und Durchführungsschwierigkeiten von Langzeitmassnahmen zur deren Erhaltung Leitparameter (bzw. Indikatoren) gefunden werden müssen, um

- lokale sowie regionale Schwankungsbreiten für Hintergrund- und Extrembelastungswerte zu erfassen und
- in langen Reihen statistische Sicherheit über die aktuelle Stoffdynamik solcher stadtnaher Auenwälder zu erreichen, um wirklich eine Veränderung der Ökosysteme bewirkende stoffliche Beeinflussung heraus filtern zu können.

Nach der Meinung der Autorin können natürliche und anthropogene Veränderungen und deren zeitliche Dynamik nur mit Hilfe hier vorgestellter Monitoring-Programme, nicht aber durch Kurzzeituntersuchungen erfasst werden. Böden stellen in diesem Zusammenhang ein besonders „beharrliches“ Element der Natur dar, da sie erst mit großer Verzögerung und sehr langsam auf Umweltveränderungen reagieren. Um so mehr ist ihr Schutz und ihre Indikatorfunktion hinsichtlich der Speicherung von Umwelteinflüssen zu unterstreichen. Darüber hinaus stellen Erkenntnisse über die Kapazität der Wälder und Böden, Säuren zu puffern, Entscheidungshilfen für den forstlichen Waldbau dahingehend dar, da bis heute sehr intensiv über Zielartenzusammensetzung der oberen Baumschicht in den verschiedenen Auenwaldarealen in Abhängigkeit von Stoffhaushalt und Stoffeintrag (u.a. GUTTE u. SICKERT 1998) diskutiert wird. Weitere Ausführungen zu diesem Thema würden aber den Rahmen dieses Beitrages sprengen.

Die Ergebnisse sind des weiteren Voraussetzung für Planungsprozesse im Landschaftsschutzgebiet „Leipziger Auwald“ sowie auch eine Diskussionsgrundlage für die Neuausweisung von Naturschutzgebieten in den Auen. Sie können als „Wegweiser“ für verschiedene Auennutzer dienen, da sie zum einen den Stoffhaushalt des Systems „Auenwald“ und zum anderen die Pufferkapazität gegenüber stofflicher Belastung aufzuzeigen in der Lage sind.

## **9 Zusammenfassung und Ausblick**

Zum *Säurestatus im Auenökosystem* läßt sich zusammenfassend sagen, dass der Rückgang der pH-Werte der Niederschläge im Raum Leipzig von

1990–96 in den Komponenten Freilandniederschlag, Bestandsniederschlag und Stammabfluss im Auenökosystem der Weißen Elster und Pleiße nachgewiesen werden konnte. Die großen Baumstämme sowie die Interzeptionsauskämmung der Arten *Quercus*, *Fraxinus*, *Carpinus* und *Acer* wurden als „Säureeintragspfade“ in die Böden ermittelt. Die Azidität der Stammabflüsse wie auch die Bodenazidität in der Umgebung der betreffenden Baumarten sind artenspezifisch.

Die gezeigten Untersuchungen lassen den Schluss zu, dass neben geologischen und pedologischen Eigenschaften in Wäldern der Bestand und seine Artenzusammensetzung eine wesentliche Rolle in Bezug auf den Säurestatus und das geochemische Reaktionsmilieu der umgebenden Böden spielen. Die räumliche Funktion des Säurestatus der Waldböden wird durch die pH-Wert-Differenzierung sichtbar, besonders wenn durch in-situ-Messung eine hohe Anzahl von Messwerten pro Fläche ermittelt werden kann. Saure Stammabflüsse sind Eintragspfade für anorganische, atmosphärisch bedingte, aber auch bestandsspezifische organische Säuren. Besonders die Stämme älterer Bäume weisen einen in der Biomasse akkumulierten „Vorrat“ an Nährstoffen und Schwermetallen auf. Stammabflüsse sind demnach als systeminterne Stressfaktoren für Bodenvegetation und Bodenfauna, einen zusätzlichen Säure-Input betreffend, anzusehen.

Es bleibt weiter festzuhalten, dass der Einsatz eines in-situ-pH-Wertmessprogrammes mit dem pH-Meter Agrar 2000 zeigte, dass und wie der Waldbestand und die Baumstämme als Ort räumlich differenzierter, spezifischer Anreicherung und Verteilung von Säuren fungieren.

Für den sich aus den Untersuchungen zum Säurestatus ergebenden Forschungsbedarf läßt sich ableiten, dass auch der Frage nach Rolle der gelösten organischen Substanz (v.a. organischer Säuren) in Bestand, Humusauflage und Oberboden von Auenwäldern nachgegangen werden müßte.

Ein aktueller Stoffeintrag erfolgt durch Fluss- und Flutungssedimente der Weißen Elster, Pleiße und ihrer Nebenflüsse, welche schluffig-tonig sind und beträchtliche Gehalte an Schwermetallen und gelöster organischer Substanz (DOM) aufweisen. Für die meisten Metalle steigen die adsorbierten Gehalte mit abnehmender Korngröße in den schluffigen Flutungssedimenten. Das gegebene Mobilisierungspotenzial der Sedimente wird auf die Böden der gefluteten Flächen übertragen und somit auch das Gefahrenpotenzial einer Wirkung und Verlagerung der Schadstoffe.

*Stoffdynamik in den Böden:* Atmosphärisch eingetragene Säuren und Schwermetalle werden in den schluffig-tonigen Auenböden elementspezifisch angereichert und an Ton- und Humuskolloide gebunden. Die Untersuchungen zur Pufferkapazität der Waldböden in gefluteten und nichtgefluteten Auenbereichen liessen die Schlußfolgerung zu, dass unter veränderten



Aziditätsbedingungen das Rückhaltevermögen der Böden gegenüber diesen Schadstoffen verändert, bodeninterne Migrationsprozesse initiiert sowie Vegetation und Grundwasser gefährdet werden, sobald die gesättigte Bodenzone erreicht ist. Daher sind der Eintragspfad von Säuren in die Böden unter Waldbestand, die Rolle des Stammabflusses als Einflussgröße bei systeminternen Stofftransporten sowie die Veränderung der Azidität der Böden entscheidende Einflußparameter der Geoökosystemdynamik unter Waldbestand. Säurestatus und Puffereigenschaften, wie sie am Dauerbeobachtungsstandort im Pleißeauenwald erfasst werden, eignen sich für die Beschreibung und Bewertung standortbezogener Stoffdynamik in (Auen-)Wäldern und werden daher als „Leitparameter“ für kleiner maßstäbliche Untersuchungen vorgeschlagen.

Die *Untersuchungen zur Pufferfunktion* in den Auenböden zeigten, dass diese Senke und Quelle für natürlich und anthropogen eingetragene Stoffgehalte zugleich darstellen und ihr Freisetzung- bzw. Rückhaltepotenzial gegenüber Nähr- und Schadstoffen stark vom pedochemischen Reaktionsmilieu abhängig ist. Veränderte Stoffeinträge wirken sich auf die Stoffsenke Boden aus und machen ihn zur Quelle der Belastungstransmission in andere Ökosystemkompartimente (z.B. Gewässer). Die Untersuchungen der Waldböden und ihrer horizontal-vertikalen Merkmalsausprägungen machen darüber hinaus deutlich, dass der Boden, unabhängig von seiner Genese und Horizontausprägung, als Zeiger aktueller Dynamik des Landschaftshaushaltes fungiert, sein Säurestatus und seine Pufferfunktion als komplexe Parameter der Umweltbewertung dienen können.

Die in dieser Arbeit angewendeten Methoden stellen in ihrer Verknüpfung ein wesentliches Arbeitsmittel für eine *standortspezifische Geoökosystemanalyse* dar. Bei der Bewertung von mineralischen und organischen Stoffgehalten in Böden und Gewässern der Auen und insbesondere von Renaturierungsflächen muss stoffgruppen- und elementspezifisch vorgegangen werden, um relevante Aussagen zur abiotischen Ökosystemdynamik zu erhalten. Der Rückgang des Staubgehaltes in der Atmosphäre der Region Leipzig muss aufgrund der hier gezeigten Ergebnisse, zumindest die Azidität der Niederschläge betreffend, kritischer bewertet werden.

Abschließend bleibt zu sagen, dass gemeinsam mit Untersuchungen zur Landschaftsstruktur und der historischen Entwicklung der Kulturlandschaft „Leipziger Auenwälder“ geoökologische Arbeitsansätze, wie sie hier vorgestellt wurden, eine wesentliche Grundlage sind, Leitbilder und Zielvorstellungen einer nachhaltigen Kulturlandschaftsentwicklung unter Berücksichtigung der natürlichen Funktionen der Ökosysteme zu entwickeln und an deren Umsetzung mitzuwirken.

## Literatur

- BERKEMEIER, A. u. H. LOOSE 1997: In der Elster-Luppe-Aue. SAX-Führer. Leipzig.
- BMEFL, Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten <sup>2</sup>1994; (Hrsg.): Bundesweite Bodenzustandserhebung im Wald (BZE). Arbeitsanleitung. Bonn.
- CONRADT, S., H. KUß und W. KÜCHLER 1998: Flächendeckende quantitative Abschätzung der Schadstoffexposition (Immission und Deposition) in Waldgebieten. In: Landesamt für Umwelt und Geologie Sachsen (LfUG) (Hrsg): Lufthygienische Situation und Waldzustand im schwarzen Dreieck. Radebeul, 81–92 (= Materialien zur Luftreinhaltung).
- FUHRMANN, R. 1999: Klimaschwankungen im Holozän nach Befunden aus Talsedimenten Mitteldeutschlands. Altenburg (= Altenburger Naturwissenschaftliche Forschungen, Heft 11).
- GUTTE, P. u. A. SICKERT 1998: Der Leipziger Auenwald – Bestand und Pflege. In: Mitteilungen des Landesvereins Sächsischer Heimatschutz e.V. 2/1998, S. 80–85.
- HAASE, D. 1996a: Schwermetallbelastung des Oberbodens und der bodennahen Luftschicht – Das Beispiel Leipzig. In: STANDORT – Zeitschrift für Angewandte Geographie 4/1996, S. 21–28.
- HAASE, D. 1996b: Untersuchungen zur Schwermetallbelastung des Oberbodens und der bodennahen Luftschicht in Leipzig auf dem Hintergrund einer Stadtstrukturtypengliederung. In: Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften Reihe A 1996, Band 18, Halle (Saale), S. 51–63.
- Haase, D. 1998: Urban ecology in the new federal countries of Germany. Contamination of upper-soil and urban atmosphere with heavy metals in Leipzig. In: Arch. für Nat.-Lands. 37, S. 45–57.
- HAASE, D. 1999: Beiträge zur Geoökosystemanalyse in Auenlandschaften – Säurestatus und Pufferfunktion der Waldböden in den Leipziger Flußauen. Leipzig: Dissertation der Fakultät für Physik und Geowissenschaften der Universität Leipzig (= UFZ-Bericht Nr. 19/1999).
- HAASE, D., A. KRÜGER, B. SCHNEIDER u. H. NEUMEISTER 1999a: Anthropogenic impact on fluvisols in German floodplains. Ecological processes in soils and methods of investigation, Proceedings of the Internat. Conference on Soil Sciences. Lublin.
- HAASE, D., A. KRÜGER, B. SCHNEIDER, u. H. NEUMEISTER 1999b: The wood stock as one main stress factor for the geochemical processes in soils of flood plain forests. The example of the Weiße Elster-Pleiße floodplains, Germany. In: Ekológia 18, pp. 25–30.
- HAASE, D., B. SCHNEIDER u. H. NEUMEISTER 1997: Auswirkungen der anthropogenen Beeinflussung des Auenökosystems der Weißen Elster und Pleiße anhand eines Tiefenprofils in einem künstlichen Überflutungsgebiet. In: Mitt. Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft, 85, III, S. 1111–1115.
- KRÜGER, A. 1995: Eigenschaft und Dynamik von Schwermetallen in belasteten Böden und Fließgewässern unter dem Einfluß von Huminstoffen. Leipzig: Dissertation A der Fakultät für Physik und Geowissenschaften, Abteilung Geochemie, der Universität Leipzig.
- KRÜGER, A., B. SCHNEIDER u. H. NEUMEISTER 1998: Structural properties of humic substances and metal-humic-complexes depending on their origin and genesis. ROSE-Tagung, Karlsruhe, Poster.
- LfUG (= Landesamt für Umwelt und Geologie Sachsen) 1996: Bodenatlas des Freistaates Sachsen, Teil 1: Hintergrundwerte für Schwermetalle und Arsen in landwirtschaftlich genutzten Böden. Freistaat Sachsen, Landesamt für Umwelt und Geologie. Radebeul.
- LfUG (= Landesamt für Umwelt und Geologie Sachsen) 1997a: Emissionssituation in Sachsen. Radebeul (= Materialien zur Luftreinhaltung.).
- LfUG (= Landesamt für Umwelt und Geologie Sachsen) 1997b: Vorschläge zur Weiterentwicklung des Systems waldbestockter Naturschutzgebiete im Freistaat Sachsen. In:

- Materialien zu Naturschutz und Landschaftspflege 1/1997. Radebeul.
- LfUG (= Landesamt für Umwelt und Geologie Sachsen) 1998: Jahresbericht zur Immissions-situation 1998. Radebeul.
- LUFT, F. 1993: Untersuchungen zur Wasserqualität der Paußnitz nach der Einspeisung von Wasser aus der Weißen Elster. Studie im Auftrag des Naturschutzamtes der Stadt Leipzig. Umweltinstitut Leipzig e.V. Hrsg. v. Naturschutzamt der Stadt Leipzig. Leipzig.
- MARQUARDT, W. u. E. BRÜGGEMANN 1998: Nationale und grenzüberschreitende Auswirkungen von Emissionen auf Regenwasserinhaltsstoffe in sächsischen Grenzregionen. In: LfUG (= Landesamt für Umwelt und Geologie Sachsen), Jahresbericht zur Immissions-situation 1998, Materialien zur Luftreinhaltung 1998. Radebeul, S. 43–52.
- MEIWES, K.-J. 1984: Chemische Untersuchungsverfahren für Mineralboden, Auflagehumus und Wurzeln zur Charakterisierung und Bewertung der Versauerung in Waldböden. Göttingen (= Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme/Waldsterben. Bd. 7, Universität Göttingen).
- NAGEL, C., G. PEKLO, B. NIEHUS, H. LOHS 1991: Atmosphärische Stoffeinträge und ihre Wirkungen auf den Naturraum, In: NEUMEISTER, H. (Hrsg.): Ausgewählte geoökologische Entwicklungsbedingungen Nordwestsachsens. Institut für Geographie und Geoökologie der Akademie der Wissenschaften der DDR (= IGG) Leipzig, 1991, S. 229–340.
- NEUMEISTER, H., D. HAASE u. R. REGBER 1997: Methodische Aspekte zur Ermittlung von Versauerungstendenzen und zur Erfassung von pH-Werten in Waldböden. In: Petermanns Geographische Mitteilungen, 141, Heft 5+6, S. 385–399.
- OTTO, H.-J. 1992: Waldökologie. Stuttgart.
- POPP, P., B. FEIST, B. NIEHUS, G. PEKLO u. U. THUSS. 1997: Vorkommen und Verteilung von toxisch relevanten organischen Komponenten und Schwermetallen in ausgewählten Untersuchungsgebieten. Leipzig (= UFZ-Bericht Nr. 25/1997).
- PRESS, F. u. R. SIEVER 1995: Allgemeine Geologie. Heidelberg.
- RABEN, G. u. H. ANDREAE 1998: Bodenzustand und Belastung durch Stoffeinträge in sächsischen Waldökosystemen. Radebeul, S. 93–102. (= Materialien zur Luftreinhaltung 1998, hrsg. v. LfUG).
- REHM, A. 1996: Leipzigs Wälder. Städtisches Grün in Geschichte und Gegenwart. Beucha: Sax Verlag.
- SCHNEIDER, B., A. KRÜGER, D. HAASE, u. H. NEUMEISTER 1999: Bindung und Mobilisierung von Schadstoffen in Überflutungssedimenten der Weißen Elster. In: FRIESE, K., K. KIRSCHNER u. B. WITTER (Hrsg.): Stoffhaushalt von Auenökosystemen der Elbe und ihrer Nebenflüsse. Leipzig, S. 5–7 (= UFZ-Bericht 1/1999).
- SCHÜÜRMAN 1996: Untersuchung der Mobilisierung sedimentierter Schwermetalle durch die Reduktion der kalkhaltigen Staubemissionen in der Dübener Heide. Abschlußbericht REGNAL, Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle. Leipzig.
- SIGG, L. und STUMM 1996: Aquatische Chemie. Eine Einführung in die Chemie wässriger Lösungen und natürlicher Gewässer. Zürich, Stuttgart.
- SML: Sächsisches Staatsministerium für Landwirtschaft, Ernährung und Forsten 1997: Waldschadensbericht. Dresden.
- WILD, A. 1995: Umweltorientierte Bodenkunde. Heidelberg, Berlin, Oxford.
- ZEIEN, H., G.W. BRÜMMER 1991: Chemische Extraktionen zur Bestimmung der Bindungsformen von Schwermetallen in Böden. Berichte aus der ökologischen Forschung, Bundesministerium für Forschung und Technologie, Bonn (= BMFT) Forschungsvorhaben 0339059, 6.
- ZIECHMANN, W., U. MÜLLER-WEGENER 1990: Bodenchemie. Mannheim.