

Projekt: Rieselfelder südlich Berlin - Altlasten, Grundwasser, Oberflächenwasser. Teilprojekt 1: Bodenkundliche Untersuchungen

Projektleiter:

Oswald Blumenstein
(AG Stoffdynamik in Geosystemen)

Mitarbeiter:

Wolfgang Bechmann, Heinz Bukowsky, Franka Fischer, Ingo Kapp, Hartmut Schachtzabel, Rudolf Schubert

Projektbeschreibung

Ziel des Projektes

Die Existenz einer großflächigen Bodenkontamination setzt eine Gefährdungsabschätzung voraus, in welcher es gilt, die potentielle, aktuelle und latente Gefahr für die Umwelt und den Menschen nachzuweisen. Für die Rieselfelder Berlin-Süd wurde in diesem Projekt deshalb eine raumdeckende Erfassung von Struktur- und Milieuparametern des Bodens sowie seines Last- und Schadpools vorgenommen. Gleichzeitig stand die Erfassung und Darstellung der saisonalen bzw. technogenen Variabilität dieser Parameter im Vordergrund. Die rechen-technisch aufbereiteten Daten dienen einer Bewertung der potentiellen und aktuellen Gefährdung des Aquifers sowie der Entscheidungsfindung für künftige Nutzungsstrategien in konkreten Räumen.

Ergebnisse und Diskussion

Resultate von Screeninguntersuchungen (vgl. Abb.1) verschiedener Standorte mittels Röntgenfluoreszenzanalyse belegten, daß in den Raumbereichen mit organischer Substanzakkumulation der Anteil der silikatischen Matrix (SiO_2) zurückgeht und daß in den Rieselfeldböden

- Organica,
- Phosphor-, Calcium- und Schwefelverbindungen,
- Cd, Cu, Cr, Ni, Pb, Zn, Hg, Sn, Bi und Ba, in den

oberen Bereichen der Grabensedimente auch Ag, Br, Co akkumuliert wurden.

Von dem zur Verfügung stehenden Methodenspektrum der Erfassung des Ist-Zustands wurde eine dimensionsspezifische Rasterbeprobung nach dem Prinzip einer Gebietsschichtung über systematische Zufallsstichproben realisiert. Festzustellen war ein prinzipiell gleiches Anordnungsmuster der Gehalte an organischer Bodensubstanz mit Maxima in den Einleiterbereichen und einer konzentrischen Verteilung mit abnehmenden Werten bei wachsender Entfernung von diesem Areal. Aus der signifikanten Korrelationen zu den Schwermetallgehalten folgte, daß damit auch deren Raummuster widerspiegelt wurden. Die Verteilungsmuster der Sorptionskapazität, der Bodenfeuchte sowie der Gesamtstickstoffgehalte zeigten ein gleichsinniges Verhalten. Im Unterboden war kein regelhaftes Stoffverteilungsmuster erkennbar, ebenso auf langfristig aufgelassenen Flächen.

Luftbilder stellten nur bedingt geeignete Hilfsmittel dar, um die Flächennutzung sowie die Raumstrukturen von aktuellen und umgestalteten Rieselfeldern zu kartieren, denn es mußte auf die Indikatorparameter Vegetationsvitalität, -feuchte bzw. Bodenfeuchte zurückgegriffen werden. Die durchgeführten geophysikalischen Untersuchungen belegten, daß es mit diesem Verfahrensspektrum besser möglich ist, räumliche Anordnungsmuster auf Rieselflächen zu erfassen, welche eine Klassifikation der Flächen in Einleiter-, Zentral- und Peripheriebereiche bzw. Dämme zuließen (vgl. Abb.2).

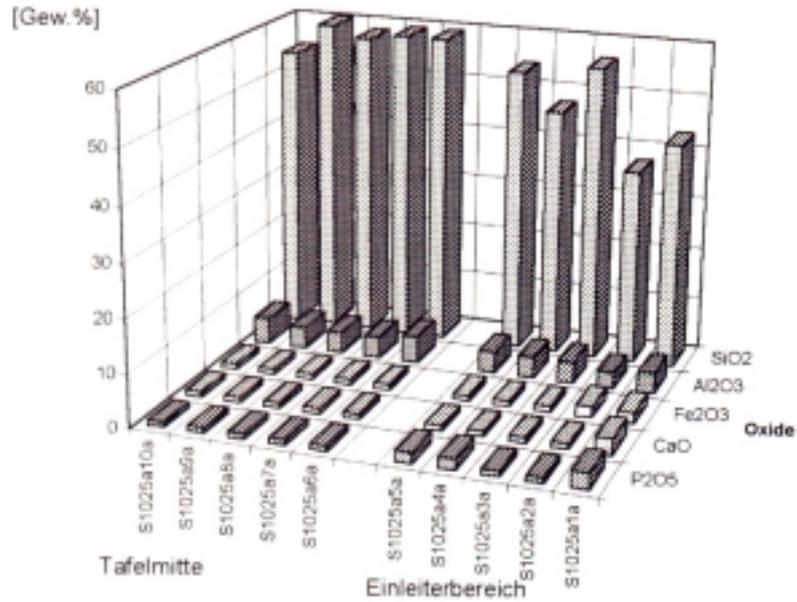


Abb. 1: Screeningergebnisse

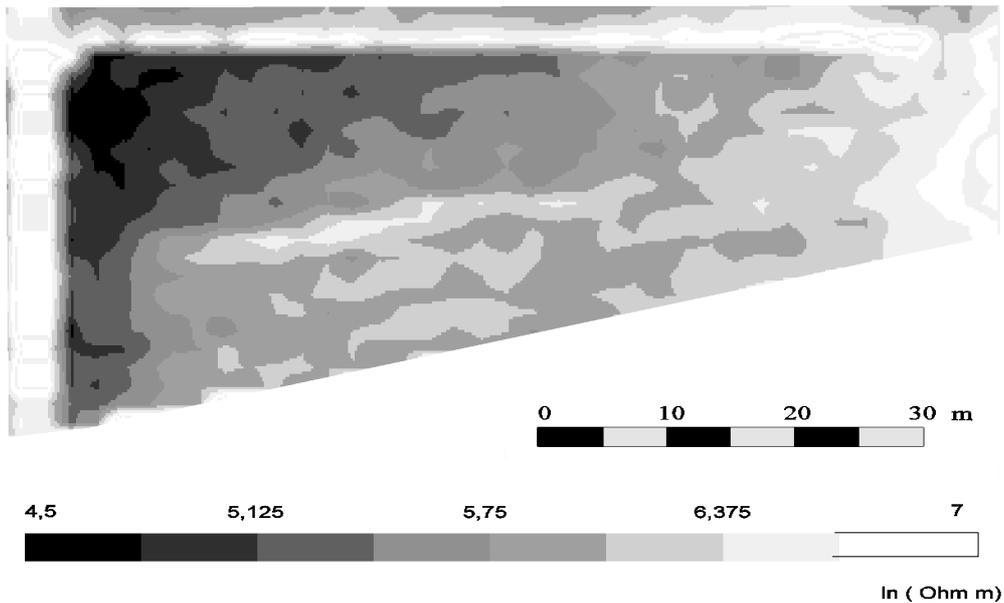


Abb. 2: Raummuster nach terrestrischer und geophysikalischer Kartierung

Auf Basis der tafel- bzw. schlaginternen Unterschiede sind kartographische Darstellungen der Bodenkontamination entwickelt worden.

Die Rieseltafeln stellten das bedeutendste Raumelement dar. Die Fixierung des im Abwasser geführten Stoffpools erfolgte hauptsächlich im Oberboden. Hier traten bedeutsame Grenzwertüberschreitungen der Schwermetalle auf. Die Bodenreaktion war überall dort, wo Abwasser den Boden durchströmt, schwach sauer. Bindigere Schichten des Bodens wurden als Sickerbahnen gemieden, so daß hier keine bedenklichen Kontaminationen festgestellt werden konnten. Die Konzentrationen der analysierten

Stoffgruppen PAK, PCB und DDT waren geoökologisch relevant, ebenso die Elemente Arsen, Thallium und Quecksilber.

In den Zwischenabsetzbecken und Intensivfiltern waren die Schwermetallbelastung der getrockneten Feststoffe sowie die gemessenen Gehalte an organischen Schadstoffen sehr hoch. Die Untersuchungsergebnisse für die Zuleiter zeigen eine große Schwankungsbreite der Meßwerte. Die obersten Bodenbereiche der Sedimente konnten stark kontaminiert und reich an organischer Substanz sein, die pH-Werte des Bodenmaterials waren infolge der Abwasserbeaufschlagung schwach sauer. Die in Dämmen gemessenen Schwermetallwerte überschritten ubiquitäre Werte deutlich. Insbesondere das schwer mobilisierbare Blei, auch Kupfer, Zink Cadmium und die PAK waren relevant, hingegen die PCB-Gehalte nicht. In den Sedimenten der Vorfluter traten überall dort, wo Beaufschlagungen stattfanden, Cadmium und Quecksilber als Kontaminanten in Erscheinung. Lokal waren auch Kupfer und Zink von Relevanz. Es wurden die Prüfwerte Ia der „Brandenburger Liste“ z.T. erheblich überschritten, vielfach auch die Prüfwerte II. Generell traten keine, über ubiquitäre Konzentrationen hinausgehende Anreicherungen organischer Schadstoffe in den Grabensedimenten auf. Die geoökologische Relevanz des subhydrisch fixierten Schwermetallpools wurde durch seine milieubedingte Mobilität verschärft, denn die Sedimentkörper der trockenfallenden Vorfluter wiesen infolge der Erhöhung des Redoxpotentials eine Zunahme der Acidität auf, im Extremfall wurde $\text{pH} < 4,0$ erreicht. Im Bereich der Grabenböschungen existierten keine Schadstoffkontaminationen. Anhand der Cadmium-, Zink- und Bleiwerte konnte belegt werden, daß der Mündungsbereich eines Grabens in den Hauptvorfluter Nuthe eine Senke für den aus dem Rieselfeld remobilisierten Stoffpool darstellt.

Hinsichtlich möglicher Phänomene der Vertikalverlagerung/Fixierung des Schwermetallpools in der Aerationzone zeigte sich für alle Rieselfeldstandorte, daß die substrat- bzw. milieubedingte Barrierewirkung des Untergrundes zu einer Erhöhung der Schwermetallgehalte über den geogenen Level hinaus führt, diese jedoch im Vergleich zum Oberbodenkompartiment keine wesentliche ökologische Relevanz besitzt. Unterhalb von Absetzbecken kann mit einem Schadstoffinput in den obersten Aquiferbereich gerechnet werden.

Eine Bilanzierung des Schadstoffpools im Bodenkompartment war auf Grund der beschriebenen Heterogenität seiner Fixierung im Untersuchungsgebiet äußerst schwierig und konnte auch nur für die raumgreifend auftretenden Schwermetallspecies exemplarisch, unter Zugrundelegung von mittleren Stoffkonzentrationen erfolgen.

Trotz deutlich unterschiedlicher Gesamtbelastung der Einleiterbereiche und der Proben, die der Tafelmitte entnommen wurden, unterschieden sich die PAK-Profile der Rieseltafeln im Durchschnitt um weniger als 1 %. Das war ein deutlicher Nachweis dafür, daß für die Tafeln die gleiche Immissionsquelle verantwortlich war. Der Anteil der ökologisch besonders bedenklichen hochmolekularen polyzyklischen Aromaten war in den Rieselfeldsubstraten signifikant höher, besonders auf den Rieseltafeln ist er durch Geoakkumulation entstanden, denn in den Böden hat während der Abwasserverrieselung besonders der Anteil der polyzyklischen Aromaten zugenommen, die eine geringe Abbaubarkeit und Wasserlöslichkeit, große Sorptionskoeffizienten an die OBS und hohe ökotoxikologische Bedenklichkeit zeigen.

Die von dem im Bodenkompartment fixierten Stoffpool ausgehende potentielle Gefährdung resultierte aus der Art der Last- und Schadstoffspecies bzw. der Mikrobionta sowie ihrer raumkonkreten Konzentration. Entscheidend war zunächst, daß der Retardationseffekt des Bodenkompartmentes gegenüber den Last- und Schadstoffen so groß ist, daß diese nur in „homöopatischen“ Dosen und/oder weniger toxischen chemischen Konfigurationen in die benachbarten Raumkompartimente gelangen.

Eine aktuelle Gefährdung aller benachbarten Kompartimente ist durch die Minderung der geochemischen Barrierefunktion gegeben. Art, Umfang und Intensität wurden durch die Verringerung der Gehalte an organische Bodensubstanz, die Zunahme der Acidität des pedochemischen Milieus, sowie die Umwandlung organisch fixierter Nährstoffkomponenten (N, P, S) in anorganische Species bestimmt. Als Indikationen konnten die Austräge über die Dränwässer, der Transfer in die anstehende Vegetation sowie die Resultate der umfangreichen Elutions- und Lysimeterversuche gelten. Ihre kartographische Darstellung war durch eine Verknüpfung relevanter, über raumtypische Gehalte naturnaher Geo-

systeme hinausgehende Akkumulationen an organischer Substanz (OBS > 3%) mit einem relevanten Schwermetallpool (der dem Prüfwert Ia der Brandenburger Liste entspricht) und dem mobilisierend wirksam werdenden pedochemischen Milieubedingungen (pH<4,5), vorgenommen worden (vgl. Abb.3).

Aus den Ergebnissen der mathematischen Prognosemodelle konnte geschlußfolgert werden, daß es bei Nutzungsumwidmung möglich ist, die Vertikalverlagerung des Schwermetallpools durch Lehmstrukturen in gewissen Grenzen zu kompensieren.

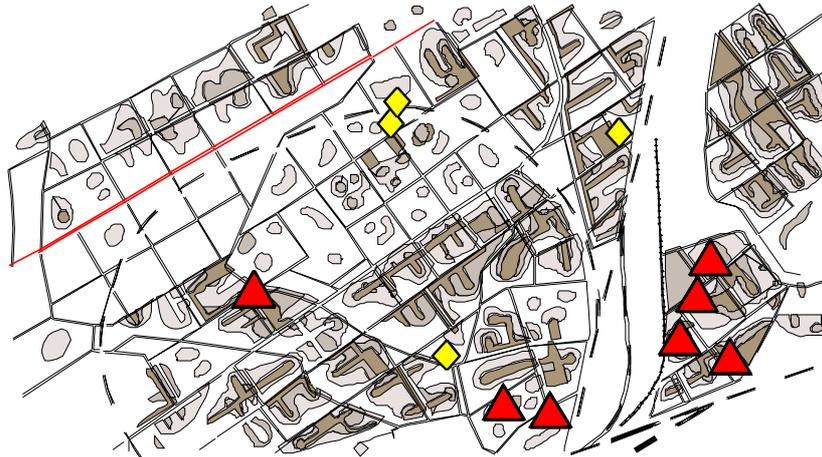


Abb. 3: Ausschnitt der Karte „Aktuelle Gefährdung“

Kooperationspartner

Tröger, Uwe, Prof. Dr. (TU Berlin, Fachgebiet Hydrogeologie)

Portmann, Hans-Dieter, Dr. & Tessmann, Joachim, Dr. (LUA Brandenburg, Nebenstelle Trebbin)

Literatur

Bechmann, W.; Grunewald, K. (1995): Organische Schadstoffe in Böden und Substraten des Rieselfeldgebietes südlich Berlin.- Z. Pflanzenern. Bodenk. 158, 543-548.

Blume, H.-P.; Blumenstein, O.; Böhme, M. et al. (1995): Empfehlungen des Wissenschaftlich-technischen Beirates Rieselfelder (WTB) beim Landesumweltamt Brandenburg zur Rieselfeldnachnutzung im Umland von Berlin.- Studien und Tagungsberichte des LUA Brandenburg 9, 99-115.

Blumenstein, O.; Tröger, U.; Portmann, H.-D. (1997): Rieselfelder südlich Berlin - Altlasten, Grundwasser, Oberflächenwasser.- Studien und Tagungsberichte des Landesumweltamtes Brandenburg, Band 13/14, Potsdam, 297 S..

Projekt: Rieselfelder Berlin-Süd - Multivalente Beurteilung der ökologischen Relevanz von Last- und Schadstoffen - Aufbau eines Bodeninformationssystems

Projektleiter:

Oswald Blumenstein
(AG Stoffdynamik in Geosystemen)

Mitarbeiter:

Wolfgang Bechmann, Heinz Bukowsky, Franka Fischer, Rüdiger Knösche, Hartmut Schachtzabel, Werner Schade, Ingo Schneider, Rudolf Schubert

Projektbeschreibung

Ziel des Projektes

Zur Schaffung von politisch-administrativen Entscheidungshilfen für zukünftige Nutzungsstrategien der Rieselfelder waren Aussagen zum Prozeßverhalten der in situ fixierten Last- und Schadstoffe notwendig. Basierend auf Voruntersuchungen wurden Aussagen zu Bodenkörpern unterschiedlicher Dimensionierung, zu Bindungsformen und der Adsorptions-Desorptionsproblematik der Schadstoffe, zur Raum-Zeit-Dynamik von Mikroorganismengruppen und zum Schwermetalltransfer in die in situ Vegetation vorgenommen. Die Schaffung einer Datenbank „Stoff- und Milieuparameter“ der Rieselfeldböden sowie die Erarbeitung und Validierung von Modellierungsansätzen waren weitere Arbeitsschwerpunkte.

Ergebnisse und Diskussion

Als Ergebnis konnte herausgestellt werden, daß sich mit der regelmäßigen Abwasserbeaufschlagung in dem Geosystem „Rieselfeld“ ein neuer, metastabiler Zustand herausbildete, für dessen Raum-Zeit-Beziehungen ein bestimmtes Niveau von Fließgleichgewichten kennzeichnend ist. Ursache für diesen Evolutionsprozeß ist die Veränderung der Kontrollparameter (Zustandsgrößen der Systemumgebung) durch die Abwasserbeaufschlagung, welche die Fließgleichgewichtsbedingungen der Interaktionen zwischen den Systemelementen und -kompartimenten bestimmen.

Folgende Veränderung der Systemparameter konnten in dem Bericht belegt werden (Abb.1)

- Eine Abnahme der Gesamtheit der Redoxpotentiale und der Bodenacidität (Zunahme der pH-Werte), verbunden mit einer Zunahme der Pufferkapazität sowohl gegenüber Basen als auch Säuren.
- Eine Anreicherung organischer Bodensubstanz (OBS) und Änderung ihrer qualitativen Charakteristika, wie engeres C/N-Verhältnis, Zunahme der Gehalte an OCH_3 , CO- bzw. CN-C und höhere Gehalte an aliphatischem C, verstärktes Auftreten von Amidbindungen und höhere Anteile an Peptiden, hoher Anteil leichtflüchtiger und damit mobiler organischer Verbindungen in den Einleiterbereichen, welcher bei nichtbeaufschlagten oder aufgelassenen Arealen deutlich verringert ist, relativ weniger Kohlenhydrate, Ligninbausteine, Alkylaromaten, mehr Verbindungen mit hochmolekularen Bausteinen, wie Lipide, Sterole, Fettsäuren, eine höhere Stabilität der molekularen Strukturen, welche sich auch noch nach mehrjähriger Umstellung auf ackerbauliche Nutzung zeigt und ein relativ großer Anteil mikrobiell leicht umsetzbarer N-Verbindungen, woraus sich ein großes Nitrifikationspotential ergibt.
- Die Erhöhung des Wassergehaltes führte zur Auslösung zusätzlicher Volumenströme an Sickerwasser, zur Dekarbonatisierung des Substrates bis in die tiefere Aerationzone hinein und dadurch zu einer verstärkten Auswaschung von Mg, Na und K.
- Es trat eine Anreicherung von Nährstoffkomponenten (P- und S-Verbindungen), anorganischen (insbesondere die Schwermetalle Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn; punktuell die Elemente As und Ba) und organischen (vor allem PAK, PCB, DDT und Analoga) Xenobiotika, inerten und instabilen Komponenten (z.B. Cl, NO_2) sowie biogenen Organica (Fette, Eiweiße, Kohlenhydrate) sowohl als

Bio- als auch Nekromasse auf Die Dynamik der geogenen Elemente Fe, Mn und Al wurde entscheidend verändert.

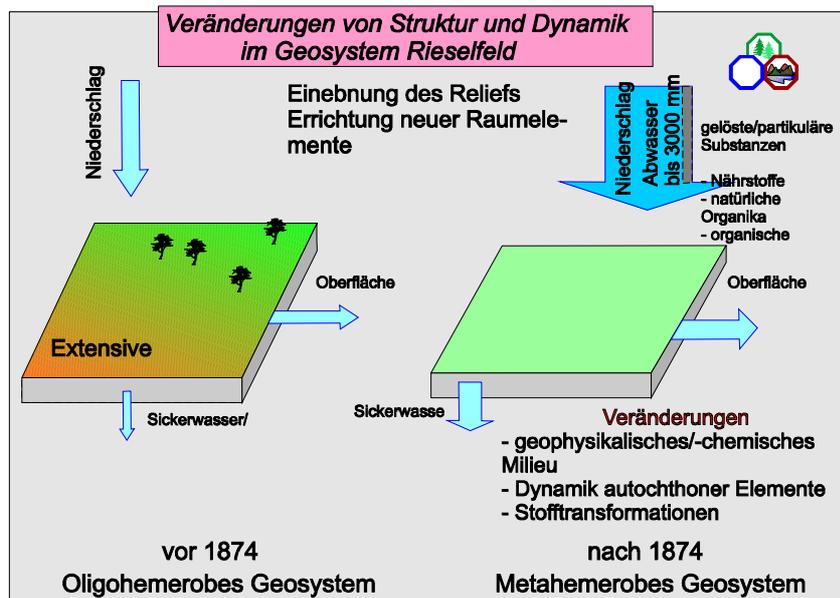


Abb. 1: Rieselfeld als hemerobes System

Aussagen über den mobilen sowie leicht nachlieferbaren Anteil des fixierten Schwermetallpools konnten mittels extraktiver Bestimmung der Bindungsformen gewonnen werden. Für Rieselfeldsubstrate erreichte er bei Cd ca. 24 %, Pb wies dagegen eine geringe Mobilität auf. Auch bei Cu war der lösliche Anteil gering, für Zn und Ni betrug der mobile Anteil etwa 20 %. Für Cr ergab sich eine geringe Verlagerbarkeit und Verfügbarkeit. Mit Ausnahme des letztgenannten war bei allen übrigen Schwermetallelementen die organische Bindungsform dominierend.

Auf Grund ihrer chemischen Eigenschaften (insbesondere Hydrophilie, Lipophilie), war die Mobilität der meisten organischen Schadstoffe im System Boden-Bodenwasser-Grundwasser sowie ihre Pflanzenverfügbarkeit gering, eine Migration dieser Schadstoffspezies in benachbarte Kompartimente (Aquifer, Vegetation) somit wenig wahrscheinlich. Für Metaboliten müßte dies noch geklärt werden. In Verbindung mit spezifischen Abbauraten der organischen Xenobiotica blieb somit das systeminterne Gefährdungspotential erhalten. Adsorptionsuntersuchungen konnten belegen, daß es sich bei der Fixierung der organischen Xenobiotica um Physiosorption handelte. Die adsorbierte Menge am Rieselfeldsubstrat war größer als am Ackerboden, dieser adsorbierte jedoch pro Masseinheit OBS mehr organische Xenobiotica.

Auf aktiven Rieseltafeln war die Anzahl der aerob proteolytischen Bakterien verringert. Auch bei den potentiell pathogenen Bakterien wurde das Berieselungsregime deutlich. Durch die Nährstoffzufuhr sowie die Feuchthaltung wurden die übrigen Gruppen gefördert. Die höchsten Keimzahlen traten in den obersten 10 cm der Bodenzone auf. Eine hohe Schwermetallbelastung wirkte negativ rückkopplend auf die Mikroorganismen, die Bodenatmung und die untersuchten Bodenenzyme. Die Saccharase und die neutrale Phosphatase waren davon nicht unmittelbar betroffen. Die Negativeffekte wurden durch hohe Gehalte an organischer Bodensubstanz verringert. Allerdings waren bei niedrigen OBS-Gehalten schon durch geringere Schwermetallkonzentrationen Beeinträchtigungen der Lebenstätigkeit möglich. Deren toxische Wirkung war abhängig von den Bindungsformen, die Wirkung unterschied sich nach ihrer Selektivität, Reversibilität, Direktheit und zeitlichen Dimension. Bakterien reagierten gegenüber einer Schwermetallbelastung empfindlicher als Pilze. Cadmium, Quecksilber und Arsen hatten die größte Wirkung, Zink die geringste. Eine hohe Schwermetalltoleranz wiesen aus Rieselfeldsubstrat isolierte hefeartige Pilze auf. Bei geringen Gehalten an organischer Bodensubstanz bzw. Schwermetallen war eine intensive Bodenatmung zu verzeichnen. Nahmen die Konzentrationen der metallischen Xenobiotica, insbesondere an Cadmium, Arsen und Quecksilber zu, so konnte sich die

Intensität dieses Prozesses um mehr als die Hälfte verringern. Bei aktiv beaufschlagten Flächen ist die höhere Bodenfeuchtigkeit positiv rückkoppelnd wirksam.

Im gesamten Rieselfeldbereich wurden bei *Dactylis glomerata* die Richtwerte für Cadmium überschritten. Auf aktiv beaufschlagten Rieseltafeln waren jedoch die Metallgehalte in den Pflanzenwurzeln dieser Art in den Bereichen der höchsten Bodenbelastung deutlich vermindert. Die Verringerung der Mobilität der Schwermetalle ist mit einer Redoxpotentialsenkung, Anhebung der Bodenreaktion sowie der Existenz einer höheren Anzahl von Adsorptionsstellen bzw. Komplexierungsmechanismen begründbar. Die Akkumulationskoeffizienten unterlagen jahreszeitlichen Schwankungen und streuten sehr stark, da nicht die Gesamtbelastung für die Aufnahme durch die Pflanzen, sondern der pflanzenverfügbare (wasserlösliche / leicht mobilisierbare) Anteil entscheidend ist. Weil die Schwermetalle besonders von jungen Wurzeln schnell aufgenommen werden, wurde schon einen Monat nach Beginn der Vegetationsperiode der typische Akkumulationswert erreicht. Mit zunehmender Bodenbelastung verringerte sich die Variationsbreite der Akkumulationskoeffizienten, verbunden mit der Tendenz zu niedrigeren Werten, zurückzuführen auf mögliche toxische Wirkungen. Die Bewässerungsversuche in Lysimetern belegten, daß mit Ausnahme von Cadmium und Zink kein signifikanter Verlust der Schwermetallast aus der Streuauflage zu verzeichnen war, im L-Horizont mit seiner frischen, noch wenig fermentierten Streu, ergab sich sogar eine Aufkonzentrierung.

Auf umgestalteten, ackerbaulich genutzten Flächen nahm der Gesamtgehalt an organischer Bodensubstanz ab, verbunden mit einer relevanten Zunahme der Acidität. Ursache für diesen Systemalterungseffekt war die Intensitätserhöhung aerober Prozesse. Infolge der Wirkung von Hystereseeffekten ist eine Remobilisierung des gesamten Stoffpools nicht möglich. Die Tendenz nahm, mit Ausnahme von Cr, im allgemeinen mit abnehmendem pH-Wert zu, für Al, Fe und P existiert ein Minimum im schwach sauren Bereich. In den Eluaten wurden die Richtwerte der „StUFA-Liste“ für Cd, Cu und Zn überschritten. Allerdings ergab sich, infolge der Dominanz der organischen Bindungsformen und des Auftretens von Ionenkonkurrenzen, bei Rieselfeldböden und unter Nutzung von in situ Infiltraten (Klärwerksabläufe, Niederschlagswasser) schon ein Löslichkeitsmaximum um pH = 5. Im Ergebnis zeigte sich auf Tafeln, welche wenige Jahre nicht mehr berieselt wurden, daß Schwermetallgehalt bzw. die -konzentration in den Pflanzenwurzeln und den Dränwasserausläufen deutlich höher sind. Die akuten toxischen Tests auf wirkungsbezogenen Nachweis des Schwermetalltransfers waren für die vorliegenden Konzentrationen im Wasserpfad ungeeignet, da wahrscheinlich atoxische Bindungsformen vorlagen.

Die Prognoserechnungen mit und ohne Systemalterung führten zu wesentlich unterschiedlichen Aussagen. Ohne ihre Beachtung laufen die Verlagerungsprozesse relativ langsam ab. Bei einfacher Infiltration (0.70 mm d^{-1}) stellt sich nach wenigen Jahren ein Gleichgewichtszustand ein. Eine jährliche Zusatzbeaufschlagung (1.000 mm) mit mechanisch-biologisch gereinigtem Wasser hat eine Schwermetallanreicherung im Oberboden zur Folge. Bedingt durch die im Verlauf der Systemalterung abnehmende Adsorptionsfähigkeit sowie die Veränderung der bodenhydraulischen Parameter sinken die Festphasengehalte im Oberboden sehr schnell ab und es kommt zu einem verstärkten Schwermetallaustrag. Abnehmende Systemalterungszeiten wirken sich positiv rückkoppelnd aus, sie verstärken diesen Effekt. Die Änderung der Nutzungsspezifika des Raumes bedeutet somit eine Aktivierung der Mechanismen der aktuellen Gefährdung. Aus Sicht der durchgeführten Modellrechnungen sind daher solche Nutzungsvarianten zu bevorzugen, die möglichst große Systemalterungszeiten induzieren. Sie alle können keine Risikobeseitigung, sondern nur eine Risikominderung zum Ziel haben.

Auf Basis dieses Projektes konnte in Verbindung mit Arbeiten anderer Institutionen eine Entscheidungshilfe für die Behörden erarbeitet werden, welche die Beurteilung von über 400 Nutzungsvarianten beinhaltet.

Kooperationspartner

Tessmann, Joachim, Dr. (LUA Brandenburg, Nebenstelle Trebbin)

Mattheis, Günther, Dr. habil (TU Berlin, Geochemisches Zentrallabor)

Stein, Werner, Dr. (TU Bergakademie Freiberg, Institut für Anorganische Chemie)

Leineweber, Peter, Dr. (Hochschule Vechta, ISPA)

Renger, Manfred, Prof. Dr. (TU Berlin, Institut für Ökologie und Bodenkunde)

Literatur

Arbeitsgruppe Stoffdynamik in Geosystemen (1995): Wenn das Abwasser die Landschaft verändert. - Fallstudie einer Komplexuntersuchung kontaminierter Geosysteme.- Stoffdynamik in Geosystemen, Band 1, Eigenverlag der Arbeitsgruppe Stoffdynamik / WUT GmbH: Potsdam, 176 S..

Arbeitsgruppe Stoffdynamik in Geosystemen (1997): Neue Cocktails nur mit bewährten Rezepten? Beiträge zur Aufklärung hemerober Geosysteme.- Stoffdynamik in Geosystemen, Band 2, Eigenverlag der Arbeitsgruppe Stoffdynamik / WUT GmbH: Potsdam, 86 S..

Blumenstein, O.; Schachtzabel, H. (1995): Translokationsmechanismen von Schadstoffen in hemerober Geosystemen - Prozeßverlauf und Probleme ihrer Modellierung.- Z. Geoökodynamik 16; 3/4; 243-263